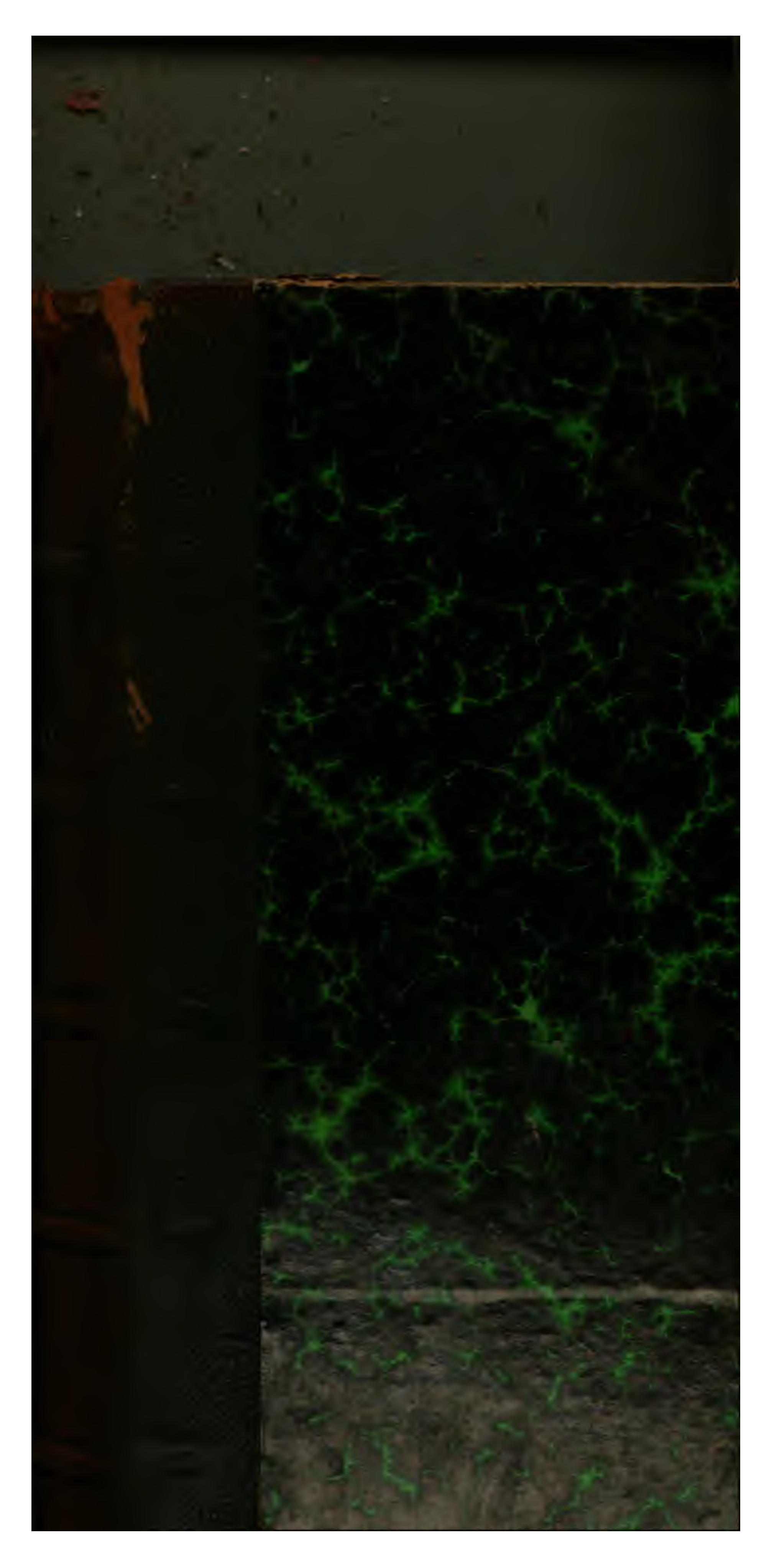
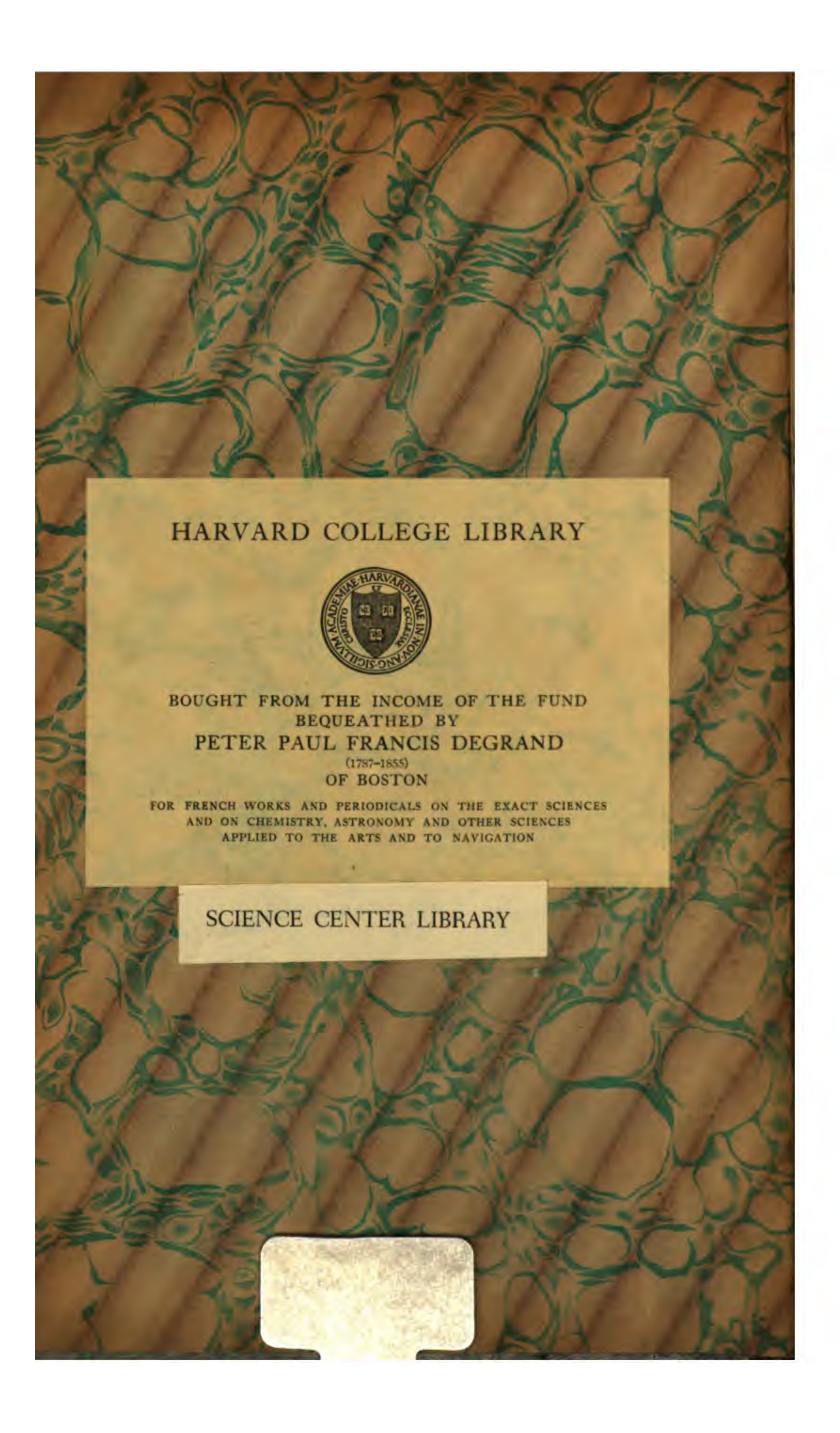



HARVARD COLLEGE LIBRARY
ACADEMIAE·HARVARDIANAE IN NOV·ANG·SIGILLVM
CHRISTO ECCLESIAE
VE RI TAS
BOUGHT FROM THE INCOME OF THE FUND
BEQUEATHED BY
PETER PAUL FRANCIS DEGRAND
(1787–1855)
OF BOSTON
FOR FRENCH WORKS AND PERIODICALS ON THE EXACT SCIENCES
AND ON CHEMISTRY, ASTRONOMY AND OTHER SCIENCES
APPLIED TO THE ARTS AND TO NAVIGATION
SCIENCE CENTER LIBRARY



ALLIAGES MÉTALLIQUES

ÉTUDE INDUSTRIELLE

DES

ALLIAGES MÉTALLIQUES

PAR

LÉON GUILLET

DOCTEUR ÈS SCIENCES

INGÉNIEUR DES ARTS ET MANUFACTURES

LAURÉAT ET MEMBRE DU COMITÉ DE LA SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS CIVILS DE FRANCE

LAURÉAT ET MEMBRE CORRESPONDANT

DE LA SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT POUR L'INDUSTRIE NATIONALE

TEXTE

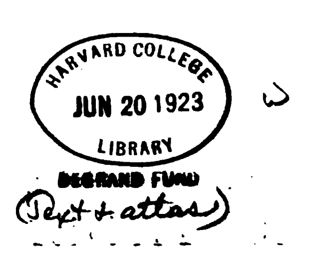
PARIS (VIe)

H. DUNOD ET E. PINAT, ÉDITEURS

SUCCESSEURS DE Vve CH. DUNOD

49, Quai des Grands-Augustins, 49

1906


HARVARD COLLEGE
JUN 20 1923
LIBRARY
DEGRAND FUND
(Text & atlas)

AVANT-PROPOS

Ce livre, qui est la suite de l'*Étude théorique des Alliages métalliques*, nous a été suggéré par cette phrase de la préface de M. H. Le Chatelier à la traduction du livre de Hiorns, par M. Boudouard (Steinhel, 1900) :

« Sur les alliages, il n'a paru encore que des mémoires isolés et assez décousus; les premiers ouvrages d'ensemble qui paraîtront sur la matière seront nécessairement des ouvrages exclusivement scientifiques et dépourvus d'intérêt pratique; il faudra ensuite un temps assez long pour réaliser la pénétration mutuelle et la consécration des données scientifiques avec la pratique industrielle... »

Certes, à l'heure actuelle, l'étude des alliages métalliques est, en de nombreux points, suffisamment avancée pour que l'on puisse bien montrer le lien intime qui unit la théorie et la pratique, la constitution des alliages et leurs propriétés.

Appelé, durant ces dernières années, à donner des conseils à des industriels que préoccupait la question des produits métallurgiques, soit au point de vue utilisation, soit au point de vue fabrication, j'ai pu constater à différentes reprises — avec quelque étonnement, je l'avoue —

que la généralité des intéressés n'était pas rebelle aux idées nouvelles, que leur esprit était vivement frappé lorsqu'on leur montrait tout le parti que l'on devait tirer de la conduite scientifique de la fabrication.

La crainte qu'éprouvent la plupart des industriels, lorsqu'on leur parle théorie et recherches nouvelles, provient souvent de ce qu'ils ignorent ces questions, en somme fort récentes, et toujours de ce qu'ils redoutent les frais que doivent entraîner ces recherches.

Or, il faut bien reconnaître que la théorie des alliages a considérablement légiféré les essais, qu'elle en a nettement réduit le cadre et qu'elle est le plus sûr, je dirai même le seul guide dans les recherches.

Aux anciennes recettes culinaires, qui conduisaient, au hasard, à perfectionner les alliages existant par des additions multiples et bizarres, doit succéder la méthode scientifique dans laquelle est défini, d'une façon précise, le rôle de chaque corps, tant au point de vue de la constitution qu'à celui des propriétés.

Le but de ce livre est de montrer, sur le terrain industriel, tout le parti que l'on peut tirer de ce principe.

D'ailleurs, en considérant les alliages actuellement utilisés, l'on voit très clairement le lien qui existe entre la constitution et les propriétés.

Nous avons voulu rappeler, au début de cette étude, les propriétés et les emplois des métaux industriels. Un chapitre a été ensuite consacré à des généralités sur les alliages métalliques.

Puis nous avons étudié les différents alliages en commençant par ceux du fer.

Chaque chapitre comprend trois parties distinctes :

1° *Étude* théorique où nous avons réuni les principaux travaux permettant d'arriver à la constitution des alliages considérés ;

2° Étude industrielle qui est, elle-même, subdivisée en trois parties :

a) Fabrication ;

b) Propriétés ;

c) Utilisation ;

3° Conclusions. — En rapprochant la seconde partie de la première, nous avons pu tirer des conclusions qui montrent l'influence de la théorie sur la fabrication ;

De plus nous avons donné les types de cahiers des charges les plus marquants des grandes Administrations.

D'autre part, nous avons réunis dans un album plus de 400 micrographies ainsi que les tableaux résumant la constitution des divers alliages. Enfin ce livre nous a été l'occasion de publier certains travaux de faible importance que nous avions depuis quelque temps dans nos cahiers de laboratoire.

Une remarque s'impose : jusqu'ici l'industrie a négligé l'une des considérations les plus importantes et qui sera peut-être un jour des plus fécondes, je fais allusion à l'influence de la vitesse de refroidissement subi par un alliage. On sait cependant quel rôle joue ce facteur dans l'utilisation des aciers trempés. — Là se sont bornées à peu près les recherches industrielles dans cette voie.

Au cours de ce livre, nous parlerons de l'influence de la vitesse de refroidissement sur les bronzes, sur les laitons, sur les alliages de cuivre et d'aluminium etc. Et si nous attirons d'ores et déjà l'attention du lecteur sur

ce point, c'est que nous le croyons plein d'intérêt pour lui, quel que soit le point de vue auquel il se place, science ou industrie.

Des tableaux synoptiques ont été dressés à la fin du livre, pour rendre les recherches plus aisées.

Une étude sur les alliages métalliques embrasse des problèmes si nombreux, des fabrications si diverses, qu'elle ne saurait être complète. Nous avons seulement cherché à ne rien omettre qui fût essentiel et nous serons heureux si savants ou industriels, théoriciens ou praticiens, qui voudront bien s'intéresser à ce travail, nous font part de leurs observations.

Puisse ce livre, à une époque de transition comme est la nôtre, où les recherches scientifiques franchissent le seuil du laboratoire pour entrer dans l'usine, servir de guide à ceux déjà convertis à ces théories et encourager les industriels, qui se sont injustement montrés réfractaires à ces idées nouvelles, à abandonner leurs vieux errements, qui font végéter leur fabrication, pour entrer dans une voie scientifique, qui leur permettra de supporter vaillamment toute concurrence et de suivre tout progrès.

Paris, Octobre 1905.

Il sera constamment question de propriétés mécaniques. A moins d'indication contraire :

R = charge de rupture par millimètre carré *à la traction*.

E = limite élastique par millimètre carré *à la traction*.

A 0/0 = allongements pour 100 après rupture *à la traction*.

Σ = striction $= \frac{S - s}{S} \times 100$, S étant la section primitive, s étant la section la plus petite après rupture à la traction.

Les essais au choc ont été faits par la méthode des barrettes entaillées avec les dimensions de Frémont.

Les essais à la dureté ont été faits par la méthode de la bille de Brinell.

LES ALLIAGES MÉTALLIQUES

ÉTUDE INDUSTRIELLE DES ALLIAGES MÉTALLIQUES

CHAPITRE I

LES MÉTAUX INDUSTRIELS

Dans ce chapitre, nous avons voulu résumer brièvement les propriétés et les utilisations principales des métaux industriels. Il faut entendre par métaux industriels les métaux qui sont employés couramment soit seuls, soit à l'état d'alliages.

On peut diviser ces métaux en trois classes :

1° Les métaux de première importance ; ce sont :

Le fer ;
Le cuivre ;
Le zinc ;
L'étain ;
Le plomb ;
Le nickel ;
L'aluminium.

2° Les métaux de seconde importance ; ce sont :

Le bismuth ;
L'antimoine ;
Le cadmium ;
Le mercure ;
Et les métaux précieux : l'argent, l'or, le platine.

3° Les métaux utilisés seulement en quantités faibles et presque toujours à l'état d'alliages :

Le magnésium ;
Le chrome ;
Le cobalt ;
Le vanadium ;
Le tungstène ;
Le molybdène ;
Les métaux de la mine du platine, autres que le platine : palladium, rhodium, iridium.

FER

Le fer, qui est certainement le métal industriel le plus important, sera l'objet d'une étude toute spéciale au chapitre III, dans lequel il sera question des alliages fer-carbone.

On y étudiera ses propriétés, ses formes allotropiques, etc. Nous ne donnerons ici que ses caractéristiques.

Point de fusion (Carpenter et Keeling)....	1.500°
Poids atomique..........................	Fe = 55,9
Densité.................................	7,86 [1]

CUIVRE [2]

Le cuivre est un métal très employé non seulement à l'état d'alliages (bronzes, laitons, etc.), mais aussi à l'état pur.

Il possède une belle couleur d'un rose rougeâtre ; il est d'une faible dureté, d'une grande ductilité; il se lamine et se tréfile avec facilité.

Point de fusion [3]........................	1.065°
Poids atomique (Baubigny)..............	Cu = 63,406
Densité.................................	8,91 à 8,95

Sa conductibilité est peu inférieure à celle de l'or et de l'argent. Le cuivre est faiblement diamagnétique.

1. La densité d'un métal varie nettement avec son mode de préparation ; c'est ainsi que, coulé, il a une plus faible densité que forgé.
2. Voir les analyses des cuivres industriels, p. 1104 et 1105.
3. Dans l'air le cuivre fond à 1065° ; dans une atmosphère réductrice, il fond à 1.084°.

Ses propriétés mécaniques sont les suivantes :

TRAITEMENT	R	A 0/0
Coulé[1]	14 à 19	?
Laminé	28 à 20	25 à 22
Laminé et recuit	19 à 21	48 à 52
En fils non recuits	45 à 49	1 à 0,1

Le cuivre rouge est utilisé à l'état de tôles, de barres et de tuyaux. Les tôles sont utilisées après emboutissage pour former les parois de chaudières et surtout de foyers intérieurs, ou pour servir de doublage dans les constructions navales ; les barres sont utilisées notamment comme entretoises des foyers de locomotives et pour le décolletage ; les tubes servent pour toutes sortes de conduites.

ZINC[2]

C'est un métal d'un blanc bleuté, ayant une cassure très cristalline à lamelles très accusées. On sait que le métal commercial présente une remarquable malléabilité vers 120 à 150°, tandis qu'il est cassant aux températures inférieures ou supérieures à celles-ci. A 205°, il possède même une fragilité telle qu'on peut le pulvériser.

Point de fusion	419°
Poids atomique (Baubigny)	Zn = 65,33
Densité	6,8 à 7,2

Ce métal se volatilise à 918° (D. Berthelot).

Les propriétés mécaniques du zinc sont peu intéressantes ; un fil de zinc de 2 millimètres de diamètre se rompt sous une charge de $12^{kg},00$[3]. Il est à noter, d'ailleurs, que le résultat

1. Il est fort difficile d'obtenir, comme nous le verrons, des moulages de cuivre pur qui soient sains.

2. Voir les analyses de zincs industriels, p. 1106.

3. A propos des différents renseignements que nous donnons sur la rupture de fils en différents métaux, lesquels sont dus à divers auteurs, nous ferons noter qu'on n'a précisé dans aucun cas l'état d'écrouissage du métal.

obtenu dépend essentiellement du temps que dure l'essai[1].

Le zinc ne s'oxyde pas dans l'air sec, mais dans l'air humide; il donne une couche d'oxyde et d'hydrocarbonate. Le zinc est un métal très volatil. Porté à 500° en contact avec l'air, le zinc donne une flamme verdâtre qui produit d'épaisses fumées d'oxyde.

Il est utilisé, grâce à la faible altération qu'il subit à l'air, pour un très grand nombre d'usages : pour la couverture des bâtiments, les gouttières, les motifs d'ornementation, etc., etc. Il est employé pour galvaniser le fer.

ÉTAIN[2]

L'étain est un métal d'un blanc très vif à cassure cristalline qui se ternit aisément à l'air; il donne le phénomène connu sous le nom de *cri de l'étain :* sous l'influence d'un pliage, il fait entendre un craquement spécial.

C'est un métal très ductile : il peut donner des feuilles de $0^{mm},00027$ d'épaisseur.

Point de fusion........................	232°
Poids atomique.......................	Sn = 118,5
Densité...............................	7,285 à 7,293

Rammelsberg a montré l'existence de deux autres variétés d'étain :

L'étain gris, ayant pour densité 5,8;

L'étain cristallin (quadratique), ayant pour densité 7,0.

Il nous semble nécessaire d'insister sur les transformations allotropiques de l'étain, d'autant plus que nous n'aurons pas l'occasion de revenir sur ce point au cours de cette étude.

Ces transformations ont été étudiées d'une façon très précise par Cohen.

C'est en 1852 que fut signalée pour la première fois une transformation de l'étain, par Erdmann, qui l'avait notée dans des tuyaux d'orgue et l'attribuait aux vibrations du métal (Société Royale des Sciences de Leipzig). En 1884, H. von Foul-

1. Voir les recherches de M. André Le Chatelier sur ce sujet, page 92.
2. Voir les analyses d'étains industriels, p. 1103.

lon (*Jahrbüch der K. K. Geologischen Anstalt*, XXXIV, 337-384) a publié un travail dans lequel il conclut à l'existence des variations suivantes :

Étain gris : poids spécifique, 5,781 à 5,809;

Étain rhomboïdal : poids spécifique, 6,52 à 6,57;

Étain tétragonal : poids spécifique, 7,196 (douteux);

Étain fondu : poids spécifique, 7,2795 (Rammelsberg).

Différents cas de transformation d'étain furent cités et étudiés : Fristche, de Saint-Pétersbourg, eut à observer un lot important de saumons d'étain Banca qui étaient tombés en poussière aux douanes russes et, d'autre part, une quantité notable de boutons destinés à l'armée et qui, conservés dans un magasin de l'État, avaient subi le même sort. La cause de cette transformation fut attribuée à la température extrêmement basse (— 38°) qui avait régné à Saint-Pétersbourg.

Fristche nota que l'étain transformé était absolument gris; mais, réchauffé seulement dans l'eau bouillante, il reprenait son éclat métallique; cette dernière transformation se faisait avec diminution sensible de volume.

Oudemans cite (Académie des Sciences d'Amsterdam, 1871) le cas d'un chargement d'étain Banca expédié en hiver de Rotterdam à Moscou par chemin de fer et qui était arrivé à destination complètement réduit en poussière.

Les différents auteurs qui ont étudié la question avant Cohen ont attribué la transformation de l'étain blanc en étain gris, les uns à un travail mécanique, les autres à l'action du froid ou des vibrations ou des deux réunis.

Cohen a étudié le phénomène d'une façon très précise, au moyen d'un dilatomètre, d'une part, et par voie électrique, d'autre part. Il est arrivé aux conclusions suivantes :

1° La désagrégation de l'étain est un phénomène de transformation réversible;

2° La température de transformation est de + 20°;

3° L'étain se trouve généralement en état instable;

4° La vitesse de transformation de l'étain blanc en étain gris est maximum à — 48°;

5° L'étain gris agit *par contagion* sur l'étain ordinaire. La transformation commencée se poursuit à la température ordinaire;

6° Les trépidations n'ont aucune influence sur la transformation de l'étain;

7° La présence de perchlorure d'étain ammoniacal exerce une influence sur la vitesse de transformation et sur la température de la vitesse maximum.

Parmi les cas de contagion les plus frappants, il faut citer le suivant : à Rothenburg, les toitures voisines de l'hôtel de ville et de l'hôtel des postes, toutes deux en étain, avaient été la première respectée, la seconde complètement transformée. Cependant les deux toitures avaient bien été soumises aux mêmes intempéries. Il a été démontré ensuite que la toiture du clocher de l'hôtel de ville présentait en un point une formation de modification grise de l'étain. Le phénomène de la transformation du toit de l'hôtel des postes a dû prendre naissance grâce à de petites particules d'étain gris que le vent aura emportées du clocher sur la toiture voisine de l'hôtel des postes. Comme le dit Cohen, il y a eu *infection.*

Les propriétés mécaniques de l'étain dépendent essentiellement de sa pureté. On peut admettre qu'un fil de 2 millimètres de diamètre en étain pur se rompt sous une charge de 24 kilogrammes.

L'étain s'oxyde très aisément, mais n'est pas volatil. Il est employé pour la fabrication d'ustensiles de ménage, de tubes, etc.; il est utilisé en feuilles pour préserver les matières alimentaires de l'air, de l'humidité, etc. Il sert à étamer le fer, le cuivre, etc. Quelques constructeurs l'utilisent *non allié* comme métal à frottement.

PLOMB [1]

Le plomb possède une couleur gris bleuâtre; il est très mou; sa cassure est blanche et fibreuse; elle devient très

1. Voir les analyses de plombs industriels, p. 1107.

cristalline, si on le chauffe dans le voisinage de son point de fusion. Il cristallise en octaèdres bien définis.

Il est très malléable, très mou.

Point de fusion........................	326°
Poids atomique........................	Pb = 207
Densité................................	11,30 à 11,44

C'est un métal volatil ; il bout entre 1.600° et 1.800° (Carnelley et Williams); il s'oxyde facilement et peut dissoudre de l'oxyde qui le durcit.

Les propriétés mécaniques du plomb ne présentent aucun intérêt. Un fil de 2 millimètres en plomb pur rompt sous une charge de 9 kilogrammes.

Il est employé pour les tuyaux d'eau, de gaz, etc. Il est utilisé sous forme de feuilles dans un très grand nombre de cas, et sa résistance à l'acide sulfurique le fait employer dans certains appareils industriels (chambres spéciales pour la fabrication de l'acide sulfurique, bacs de décapage, etc.).

Ce métal, étant très mou, est souvent utilisé pour former joint entre des pièces métalliques.

NICKEL [1]

Le nickel est d'un blanc légèrement grisâtre. C'est un métal très ductile, il se laisse bien laminer, quand il est pur : on peut l'amener à l'état de feuille de 0mm,028 d'épaisseur et de fil ayant 0mm,014 de diamètre (Richter).

Point de fusion (Copaux)................	1.470°
Poids atomique........................	Ni = 58,7
Densité (Richter, Tuppiniete)............	8,27 à 8,82

Le nickel se présente sous deux formes : le nickel α qui est magnétique, le nickel β non magnétique.

On passe de l'état α à l'état β à la température de 340° (Guertler et Tammann).

Le nickel est un métal particulièrement résistant à l'oxyda-

1. Voir les analyses de nickels industriels, p. 1108.

tion. Il dissout le carbone à haute température et le restitue à l'état de graphite par refroidissement.

Les résultats obtenus par Wedding et Rudeloff dans l'essai à la traction sur un nickel renfermant 98,35 0/0 de nickel ont été les suivants :

R	33,0
E	8,5
A 0/0	20,6

Nous avons obtenu sur un nickel contenant 1 0/0 d'impuretés, laminé et recuit :

R	50,81
E	9,4
A 0/0	43

M. Copaux a indiqué R = 42 kilos pour le nickel pur fondu.

Ce métal est utilisé notamment pour les monnaies divisionnaires (France, Belgique, Suisse, etc.), pour la confection d'ustensiles de cuisine, la fabrication des soupapes d'automobiles, etc.

Les moulages de nickel sont difficiles à obtenir sains, à cause de l'oxydation. On remédie à cet inconvénient par une addition de magnésium, ou de phosphore, au moment de la coulée.

ALUMINIUM [1]

L'aluminium préparé tout d'abord par le procédé Deville (action du sodium sur le chlorure double d'aluminium et de sodium en présence de cryolithe) est obtenu maintenant, comme l'on sait, au four électrique par l'électrolyse vers 700 à 900° d'alumine fondue additionnée de cryolithe (procédés Héroult, Kiliani, Hall).

C'est un métal d'un blanc très légèrement bleuté.

Point de fusion	657°
Poids atomique	Al = 27,1
Densité	2,56 à 2,67

Il est très bon conducteur de la chaleur et de l'électricité. Il offre une charge de rupture, par millimètre carré, de 8 à 11 kilogrammes, à l'état coulé; 17 kilogrammes, à l'état la-

1. Voir les analyses d'aluminiums industriels, p. 1109.

miné et recuit; 20 à 32, à l'état écroui. Laminé et recuit, il peut donner 16 à 20 0/0 d'allongement. Il est extrêmement malléable, il se forge et se lamine aisément. Il se recouvre lentement à l'air d'une couche mince d'oxyde, qui le protège contre une action ultérieure.

A l'heure actuelle, l'aluminium commercial contient couramment 99 à 99,5 0/0 d'aluminium; il renferme généralement 2 à 3 millièmes de fer, un peu de silicium et de sodium.

Les principales applications de ce métal sont:

1° Son emploi en sidérurgie pour l'affinage de l'acier;

2° Son emploi comme agent de désoxydation dans la fabrication de certains alliages (bronzes, laitons, etc.);

3° La fabrication de nombreux objets, notamment de plats, de batteries de cuisine, d'ustensiles militaires, de divers articles de Paris, etc.;

4° La fabrication de tubes, cornières, profilés;

5° La préparation d'alliages dont certains ont une grande importance (bronzes d'aluminium, alliages à faibles teneurs en cuivre utilisés par l'automobilisme, etc.);

6° L'obtention de températures élevées et la préparation de certains métaux;

7° La préparation de couleurs métalliques;

8° La fabrication de câbles conducteurs.

Si l'on compare, à ce dernier point de vue, les propriétés de l'aluminium à celles du cuivre, on trouve les caractéristiques suivantes (Moissonnier, *l'Aluminium*, Gauthier-Villars, 1903):

	ALUMINIUM	CUIVRE
Poids spécifique	2,68	8,93
Poids spécifique relatif	1,00	3,33
Conductibilité	54 à 63	96 à 99
Résistance à la traction par mm²	16,87 à 36,6	21,1 à 45,7

Les différentes qualités des métaux qu'on trouve sur le marché et, par conséquent, leurs différentes caractéristiques

électriques et mécaniques empêchent d'ailleurs de donner des rapports absolus. Les sections des conducteurs en aluminium et en cuivre sont en raison inverse de leur conductibilité :

$$\frac{S_A}{S_C} = \frac{97}{61} = 1,59$$

en moyenne (ce rapport est approximativement le même que celui des sections de deux fils séparés de 1 numéro dans la jauge Brown et Sharpe). Pour obtenir la même conductibilité, on prendra donc un fil de cuivre de section 1 et un fil d'aluminium de section 1,59. Au point de vue de la charge de rupture, le rapport 1,59 ne se conserve pas. Le poids par kilomètre de fil d'aluminium est de 47,77 0/0 du poids de la même longueur de fil de cuivre d'égale conductibilité.

Les conducteurs d'aluminium et de cuivre coûteraient donc le même prix par kilomètre, si le prix du kilogramme de cuivre était 47,77 0/0 du prix du kilogramme d'aluminium.

La résistance à la traction de l'aluminium pur commercial (98,50 0/0) est moindre que celle de l'aluminium allié avec une faible quantité d'un autre métal. L'aluminium pur commercial a une conductibilité de 63 0/0 à l'échelle de Mathiessen ; cette conductibilité est réduite à 58 0/0 pour un alliage à 1 0/0 ; à 54 0/0, pour un alliage à 2 0/0 de matières étrangères.

Quand on emploie l'aluminium pour faire des barres omnibus de station centrale, la question de résistance mécanique n'intervient pas et on peut employer l'aluminium pur. Des barres étirées de 25 × 152 millimètres peuvent atteindre une longueur de $4^m,25$; des barres de 12 × 100 millimètres peuvent atteindre $7^m,90$, et des barres de plus faible section peuvent être obtenues un peu plus longues.

Pour des transports de force, il n'est pas opportun de se servir d'aluminium de moins de 59 0/0 de conductibilité.

Pour le fil téléphonique, on réduit un peu la conductibilité, afin de gagner sur la résistance à la traction.

La *Hartford Electric C°* va employer l'aluminium pour transmettre 10.000 volts à $17^{km},15$ par courant triphasé. Elle

doit se servir de câbles à 7 brins, chaque brin étant composé de 7 fils n° 11 de la jauge Brown et Sharpe. On gagnera ainsi près de 18.000 francs sur le prix que coûterait la même ligne en cuivre.

L'obtention de hautes températures par l'aluminothermie nous intéresse tout particulièrement, puisqu'elle constitue une méthode de préparation des alliages connue sous le nom d'aluminothermie.

Nous insisterons sur son principe et sur ses applications :

Le principe sur lequel est basée l'aluminothermie, méthode créée récemment par M. le Dr Goldschmidt, réside essentiellement dans la réduction des oxydes métalliques par l'aluminium, réduction qui a lieu dans des conditions particulières.

Si l'on examine les chaleurs de combustion des divers corps simples, en rapportant cette quantité de chaleur au poids de l'oxyde contenant 1 atome = 16 grammes d'oxygène, on a le tableau suivant :

Magnésium (MgO)	145,5	calories
Lithium (LiO^2)	145,0	—
Calcium (CaO)	145,0	—
Strontium (SrO)	131,2 (?)	—
Aluminium (1/3 Al^2O^3)	131,2	—
Sodium (Na^2O)	100,9	—
Potassium (K^2O)	98,2	—
Rubidium (Rb^2O)	95,5	—
Silicium (1/2 SiO^2)	90,9	—
Bore (1/3 Bo^2O^3)	90,9	—
Manganèse (MnO)	90,0	—
Zinc (ZnO)	84,8	—
Phosphore (1/5 P^2O^5)	73,1	—
tain (SnO)	70,7	—
Étain (1/2 SnO^2)	70,6	—
Oxyde de carbone (CO)	68,2	—
Cadmium (CdO)	66,3	—
Fer (1/2 Fe^2O^3)	65,9	—
Tungstène (1/2 TuO^3)	65,7	—
Cobalt (CoO)	64,5	—
Nickel (NiO)	61,5	—
Hydrogène (H^2O gaz)	58,1	—
Antimoine (1/3 Sb^2O^3)	55,6	—
Arsenic (1/3 As^2O^3)	52,1	—
Plomb (PbO)	50,8	—
Bismuth (1/3 Bi^2O^3)	46,4	—
Thallium (Tl^2O)	42,8	—
Cuivre (Cu^2O)	43,8	—
Soufre (1/2 SO^2 gaz)	34,6	—
Mercure (HgO)	21,5	—
Argent (Ag^2O)	7,0	—

D'après ce tableau et le principe du travail maximum, l'aluminium devra réduire les oxydes des métaux qui le suivent dans l'énumération précédente. Cette réduction aura lieu avec une facilité d'autant plus grande que la différence des chaleurs de combinaison de l'aluminium et de l'autre métal en jeu avec l'oxygène sera plus grande.

En un mot la thermochimie nous fait prévoir des réactions telles que :

$$2Al + Fe^2O^3 = Al^2O^3 + 2Fe + (131,2 - 65,9 =) \ 65,3 \text{ calories}$$
$$2Al + 3NiO = Al^2O^3 + 3Ni + (131,2 - 61,5 =) \ 69,7 \text{ calories.}$$

Le rôle réducteur de l'aluminium est connu depuis fort longtemps ; Henri Sainte-Claire Deville et Wöhler l'établirent parfaitement.

MM. Tessier, élèves de Deville, montrèrent la réduction des oxydes de cuivre et de plomb par l'aluminium. Enfin les recherches de Deville et Wöhler relatives à l'action de l'aluminium sur les acides borique et silicique, qui aboutirent à la préparation du silicium et de borures et de borocarbures d'aluminium, étaient également basées sur ce pouvoir réducteur.

Plus récemment, il faut citer les expériences de MM. Green et Wahl, de Philadelphie, qui parvinrent à préparer le manganèse pur, par réduction du protoxyde de manganèse :

$$2Al + 3MnO = Al^2O^3 + Mn.$$

M. Moissan montra, en 1896, qu'un mélange de poudre d'aluminium et d'acide vanadique, projeté sur de l'aluminium en fusion, prend feu en donnant du vanadium qui s'allie à l'aluminium :

$$3V^2O^5 + 10Al = 5Al^2O^3 + 6V.$$

Le même savant arriva aussi à produire une réaction semblable avec les oxydes de nickel, chrome, titane, tungstène et uranium. En 1896, également, M. Hélouis prépara des alliages aluminium-vanadium, en mettant de l'acide vanadique en présence d'aluminium fondu.

M. Franck a appliqué aussi la réduction par l'aluminium à un grand nombre d'oxydes. Enfin, ce rôle réducteur de l'aluminium est utilisé pour la coulée de divers alliages, afin d'éviter les phénomènes d'oxydation.

La découverte du Dr Goldschmidt porte sur la manière dont on produit la réaction, manière extrêmement simple et fort avantageuse, puisqu'elle permet de rendre l'opération en quelque sorte continue et d'utiliser la chaleur dégagée au commencement de la réaction pour produire la réaction elle-même.

M. Goldschmidt établit que, lorsque l'on mélange de l'aluminium, en grains ou en poudre, avec un oxyde métallique, tel que Fe^2O^3, en proportions convenables et que l'on arrive à amorcer la réaction en un point de la masse, elle se propage rapidement.

Le point délicat était d'arriver à un amorçage facile de la réaction.

On opéra d'abord sur un mélange d'oxyde de chrome et d'aluminium et on essaya de produire, en un point donné, une température élevée par un jet de flamme. Après plusieurs tâtonnements, l'expérience réussit ; la réaction se propagea très facilement à partir du point d'inflammation.

L'auteur chercha alors un moyen plus simple pour produire le commencement de la réaction. Pour cela il utilisa la réaction donnée par un mélange de poudre d'aluminium et d'un oxyde susceptible de dégager son oxygène beaucoup plus facilement que les oxydes métalliques ordinaires. Les peroxydes étaient tout indiqués ; M. Goldschmidt créa alors la cartouche d'allumage, petite boule composée de poudre d'aluminium et de poudre de bioxyde de baryum, auxquelles on ajoute un agglutinant. On place cette amorce à la surface du mélange, on y enfonce un fil de magnésium ; le feu, mis à ce fil, se communique à la masse et la réaction se propage. On a entre l'aluminium et le bioxyde de baryum la réaction :

$$4Al + 3BaO^2 = 2Al^2O^3 + 3Ba.$$

Tel est le principe même de la découverte du Dr Goldschmidt.

Production des métaux par aluminothermie. — Pour bien faire comprendre le mode d'application de la méthode, nous allons décrire une expérience dans ses moindres détails.

Proposons-nous l'obtention du chrome en partant du sesquioxyde de chrome. Quatre opérations sont nécessaires :

1° La préparation du mélange ;

2° La préparation de la poudre d'allumage ;

3° La préparation du creuset ;

4° L'opération elle-même.

Préparation du mélange. — Nous devons opérer le mélange de sesquioxyde de chrome et d'aluminium.

La première précaution à prendre sera d'éviter, autant que possible, la présence de corps volatils ou décomposables à la température élevée de la réaction. Il faudra donc dessécher le sesquioxyde de chrome et s'assurer (dans un tube à essai, par exemple) qu'il ne contient plus trace d'eau.

Il faut également déterminer l'espèce d'aluminium que l'on veut adopter. En laissant de côté la question de pureté qui doit être aussi grande que possible, on peut utiliser : 1° la poudre d'aluminium impalpable; 2° l'aluminium en grains; 3° l'aluminium en copeaux.

La première sorte d'aluminium présente un grave inconvénient : ce sont les impuretés. En effet, d'après les échantillons que nous avons pu nous procurer pour des recherches personnelles, nous avons constaté que ces poudres impalpables entraînent, d'après leur préparation même, des matières grasses et du savon, en dehors de toutes impuretés inhérentes à l'aluminium initial.

Si l'on emploie un tel aluminium on peut être certain que l'on aura des explosions nuisibles à la propagation de la réaction et surtout à l'homogénéité de la masse. De plus, on pourrait aller au-devant de l'obtention d'une fonte du métal et non du métal pur, par suite du carbone des matières organiques.

Si l'on désire se servir de cette poudre, que l'on trouve aisément dans le commerce, il faut donc, avant tout, la débarrasser des matières grasses par des lavages soignés à l'essence de pétrole et à l'alcool.

Il est, en général, d'usage d'employer les grains ou les copeaux d'aluminium ; le choix n'est pas indifférent ; seule l'expérience peut donner quelque certitude à ce sujet. Toutefois, nous ferons remarquer que fort souvent le grain et la sciure ne donnent pas le même résultat. Il est donc de toute nécessité, lorsqu'on veut se rendre compte d'une réaction, d'employer toujours l'aluminium sous la même forme. Avec l'oxyde de chrome, le grain de dimension moyenne réussit parfaitement.

Déterminons maintenant les quantités des corps en présence. En général, les quantités théoriques donnent de très bons résultats ; mais, suivant la qualité et l'espèce d'aluminium employé, il faut parfois une quantité un peu inférieure ou supérieure à celle donnée par l'équation. La réaction étant

$$Cr^2O^3 + Al^2 = Al^2O^3 + 2Cr,$$

et les poids atomiques Cr = 52,4 ; Al = 27,1 ; O = 16, nous en déduisons que nous devons mettre en présence 152,8 parties de sesquioxyde de chrome et 54,2 parties d'aluminium.

Nous prenons, par exemple, $15^{kg},280$ de Cr^2O^3 et $5^{kg},420$ d'aluminium, et nous en ferons le mélange aussi intime que possible. Nous aurons ainsi préparé la matière première principale de l'expérience.

Préparation de la poudre d'allumage. — Cette poudre, comme nous l'avons dit, est composée de bioxyde de baryum en poudre et d'aluminium en poudre. Il vaut mieux se servir de poudre d'aluminium impalpable, malgré ses impuretés ; car il faut que l'intimité entre le peroxyde de baryum et l'aluminium soit aussi grande que possible.

Pesons $2^{gr},5$ de bioxyde pulvérisé et $0^{gr},5$ d'aluminium en poudre, plaçons les produits sur une feuille de papier et mélangeons-les avec une baguette de bois. Ces précautions sont

absolument nécessaires; car nous avons un mélange très explosif et le moindre choc (que l'on ne saurait éviter dans un mortier ordinaire) est à redouter.

On a ainsi préparé la poudre d'allumage.

Préparation du creuset. — Pour faire l'opération, on se sert d'un creuset en terre ou en plombagine ; cette dernière matière résiste mieux que la terre.

Il faut garnir ce creuset de magnésie, sans quoi l'on introduirait dans l'alliage final des matières étrangères provenant du creuset, notamment du silicium dans le cas d'un creuset en terre réfractaire, du carbone et même un peu de silicium dans le cas de creusets en plombagine.

Le garnissage en magnésie est une opération délicate. On fait avec de la magnésie et de l'eau une pâte que l'on applique sur les parois du creuset avec la main ou mieux avec une matrice et on laisse sécher.

Mais, si l'on se sert de magnésie calcinée à basse température, on a un retrait considérable et le revêtement se fendille au séchage. Si l'on emploie de la magnésie calcinée à haute température, la prise est fort longue et le séchage se fait difficilement. En ajoutant à la magnésie fortement calcinée un peu de magnésie calcinée à basse température, on obtient un bon résultat. Nous nous sommes servi à plusieurs reprises d'un mélange contenant 6 0/0 de magnésie calcinée à basse température que l'on humectait de 10 0/0 de son poids d'eau; nous avons eu ainsi d'assez bons garnissages ; mais parfois ils se détachent pendant la réaction.

La méthode indiquée par M. Schlœsing, qui consiste purement et simplement à comprimer à la presse hydraulique de la magnésie non humectée contre les parois du creuset, devrait donner de meilleurs résultats.

Production du métal. — Le creuset étant bien séché, on y place un peu du mélange préparé préalablement, jusqu'au quart environ du creuset. On verse ensuite au centre de la surface quelques grammes de poudre d'allumage, et l'on jette sur cette poudre une allumette enflammée. Il se produit immédiatement

une très légère explosion; le mélange BaO^2 + Al entre en réaction et communique le feu à toute la masse qui fond.

Dès que le bain apparaît liquide, on ajoute à la pelle à main le mélange Cr^2O^3 + Al par petites portions, jusqu'à ce que l'on ait dépensé toute la matière préparée.

On laisse ensuite refroidir et au bout de quelques heures on brise le creuset. Si l'opération a été bien conduite, on trouve une matière qui se sépare aisément en deux parties : le culot et une partie tronconique occupant la partie supérieure du creuset. Le culot est constitué par le métal, le chrome dans l'exemple actuel; et l'autre partie est formée d'alumine, de corindon ayant entraîné un peu de chrome.

En général, cette séparation entre l'alumine et le métal est extrêmement nette.

On conçoit, d'ailleurs, comment on peut rendre l'opération continue, avec deux trous de coulée, l'un à la partie inférieure, l'autre à une hauteur convenable dans la paroi du creuset; le premier servant à entraîner le métal, le second à enlever la scorie.

Dans la préparation du chrome, le corindon entraîne un peu de ce métal et est, de ce fait, coloré en rouge.

Le Dr Goldschmidt a donné à cette alumine spéciale le nom de corubis.

Remarques générales. — On peut se demander si la généralité de la réaction existe bien, comme le fait prévoir la théorie.

D'après les nombreuses expériences qui ont été faites à ce sujet, on peut dire que la réaction a lieu dans toute la généralité qu'indique la thermochimie, c'est-à-dire que la réduction par l'aluminium des oxydes dont la chaleur de formation est inférieure à l'alumine, se fait parfaitement. Mais l'opération n'est pas toujours facile à réaliser, et la séparation des deux parties, métal et corindon, est loin d'être nette dans tous les cas. Pour que l'opération se fasse régulièrement, il est nécessaire, avant tout, que les corps mis en présence ou se formant dans la réaction ne soient pas volatils, ou

du moins le soient fort peu à la température de la réaction.

Deux cas peuvent se produire : ou l'oxyde que l'on veut obtenir est volatil, tel est, par exemple, le cas de l'acide tungstique, de l'acide molybdique ; ou bien c'est le métal que l'on cherche à obtenir qui est volatil, tel est le cas du plomb, du zinc, etc. De toutes façons le rendement ne sera pas bon. Il est juste, toutefois, d'ajouter qu'avec des corps dont la volatilité n'est pas trop grande, l'opération marche assez régulièrement; la réduction de l'acide tungstique bien desséché est assez facile, quoique présentant quelque danger.

Quant à la séparation du métal de la scorie, elle n'a pas toujours lieu. Elle dépend beaucoup de l'espèce d'aluminium avec laquelle on a préparé le mélange, elle dépend également des quantités employées et enfin, surtout, du point de fusion du métal que l'on cherche à obtenir.

Nous avons déjà indiqué comment les résultats variaient avec l'aluminium employé. Les quantités mises en jeu ont également une très grande influence; c'est ainsi que, lorsque l'on cherche à préparer le chrome, on n'obtient aucun culot métallique en agissant sur des quantités faibles, même de 1, 2 ou 3 kilogrammes; il se forme seulement des grains répandus dans toute la masse. Ce fait s'explique aisément: le dégagement de chaleur produit par la réaction échauffe le récipient dans lequel on opère, et la chaleur, en quelque sorte canalisée, n'est pas utilisée à la fusion de la masse métallique.

Enfin, le point de fusion du métal que l'on veut préparer a une importance considérable. Plus le métal fond facilement, mieux il se rassemble au fond du creuset. C'est ainsi que les expériences faites sur le tungstène, ou du moins celles connues, n'ont donné aucun résultat, lorsque l'on n'ajoute aucun artifice au procédé Goldschmidt. Il faut, avant tout, que la température de l'expérience soit suffisante pour amener le métal à l'état de fusion.

M. Stavenhagen a pu arriver à préparer des culots de tungstène et de molybdène, en projetant, dès que la réaction

est terminée, sur l'alumine encore fondue, des feuilles d'aluminium et de l'oxygène liquide provenant de la distillation fractionnée de l'air liquide. Il se produit un phénomène de combustion extraordinairement vive, qui élève considérablement la température et permet d'atteindre les points de fusion du tungstène et du molybdène.

Évaluation de la température produite. — Le Dr Goldschmidt a évalué à environ 3.000° la température obtenue dans la préparation du chrome. Cette détermination a été faite au moyen du thermophone de Wiborgh.

M. Matignon a fait plusieurs essais avec la lunette pyrométrique de M. H. Le Chatelier; mais il se forme à la surface des corps une couche d'alumine qui empêche d'appliquer la formule établie par l'auteur de cette élégante méthode.

Qualité des métaux obtenus par le procédé Goldschmidt. — A l'heure actuelle, M. Goldschmidt à Essen-sur-Ruhr et une usine française, préparent industriellement le chrome et le manganèse dont le prix de vente élevé supporte parfaitement l'emploi de l'aluminium. Le manganèse étant légèrement volatil à la température de la réaction, il s'ensuit quelques pertes dans sa préparation.

Il est un point extrêmement important à noter, c'est la pureté des métaux préparés par le procédé que nous avons décrit, lorsque l'on part de matières premières pures. On trouve quelquefois un peu d'aluminium, mais il est relativement facile de l'éviter avec quelque habitude. En tous les cas on n'a pas de carbone, ce qui est, nous le verrons, très important dans un grand nombre de cas.

Préparation des alliages par aluminothermie. — La méthode Goldschmidt est également appliquée à la préparation des alliages.

On peut, en effet, obtenir par cette méthode la réduction simultanée de plusieurs oxydes. Si l'on veut préparer un ferrotitane, on mélangera, d'une part, l'oxyde de fer et l'aluminium et, d'autre part, l'acide titanique et l'aluminium. Puis on fera

un mélange en proportions convenables, suivant l'alliage que l'on veut fabriquer, des deux poudres ainsi préparées, et l'on opérera comme il a été indiqué pour un seul oxyde. Si les proportions ont été bien choisies, on obtiendra un culot de ferro-titane exempt d'aluminium.

M. Goldschmidt a préparé ainsi du ferro-titane à 40 et à 25 0/0 de titane.

Le premier ne peut être utilisé pour faire de nouveaux alliages à cause de son point de fusion élevé, tandis que le second est avantageusement employé.

Quant aux alliages d'aluminium, ils peuvent être très aisément préparés par cette voie. En effet, si l'on veut préparer un alliage aluminium-chrome, on prendra un mélange acide chromique-aluminium contenant de l'aluminium en excès. Celui-ci s'alliera au chrome, et on aura un culot d'alliage.

Il faut bien noter cependant que l'on ne peut préparer de cette façon que des alliages relativement peu riches en aluminium. On ne peut, en effet, ajouter au mélange un trop grand excès d'aluminium, sans risquer d'empêcher la propagation, voire même le début de la réaction. Cet excès d'aluminium limitant la réaction est très variable avec l'oxyde employé.

Nous ferons remarquer, enfin, que le résidu de l'opération est du corindon. D'après des expériences faites à Essen-sur-Ruhr, ce produit serait beaucoup plus dur que le corindon naturel; il raie l'émeri naturel et n'est pas entamé visiblement par les diamants employés pour la perforation. Cette augmentation de dureté pourrait provenir, comme le fait remarquer M. Goldschmidt, d'un peu d'oxyde de chrome ou de manganèse entraîné. Cette scorie est avantageusement utilisée pour le meulage, l'aiguisage, etc.

Le corubis, provenant de la préparation du chrome, se présente en cristaux trop faibles pour pouvoir être utilisés en joaillerie.

BISMUTH

Le bismuth est un métal très fragile, dur; sa cassure est d'un blanc brillant; elle est lamellaire:

Point de fusion (Gautier)................	267°
Poids atomique.........................	Bi = 208,5
Densité................................	9,75 à 9,82

Le bismuth est fortement diamagnétique; il se volatilise à 1.600°. On sait avec quelle facilité cristallise ce métal.
Il s'oxyde rapidement.

ANTIMOINE

C'est un métal à texture très lamelleuse ou à grains cristallins; sa couleur est un blanc bleuâtre. Il est très cassant et facile à pulvériser.

Point de fusion (-RolandGosselin)[1]......	631°
Poids atomique.........................	Sb = 120
Densité................................	6,702 à 6,860

L'antimoine s'oxyde peu dans l'air sec; mais, projeté dans l'air à l'état fondu, il y brûle très aisément.

CADMIUM

C'est un métal d'un très beau blanc; il est très mou, assez ductile et très gras.

Point de fusion.........................	322°
Poids atomique.........................	Cd = 112,4
Densité................................	8,60 à 8,70

1. Dans le travail qu'il a fait sur la fusibilité des alliages, M. Roland-Gosselin a fait remarquer que, dans tous les ouvrages de chimie et de métallurgie, l'antimoine est donné comme fondant à 430°, tandis que son point de fusion est 632°.

Le cadmium bout à 778° (D. Berthelot). Chauffé, il brûle à l'air en donnant de l'oxyde jaune brun.

MERCURE

Le mercure est liquide à la température ordinaire. Il possède un grand éclat et une forte opacité. Il ne mouille pas les corps auxquels il touche.

Point de fusion (Hutchnis)	— 39°,44
Poids atomique	Hg = 200,3
Densité (Regnault)	13,596

Ce métal n'émet de vapeur qu'à 20 ou 25°. Il est très dilatable. Le mercure est le moins conducteur des métaux.

Il ne s'altère pas à l'air, à la température ordinaire, quand il est pur. Chauffé à l'air, il s'oxyde superficiellement vers 350°.

On sait que le mercure est très employé; l'extraction de l'argent et de l'or en consomme des quantités importantes. Il est utilisé pour l'étamage des glaces, la construction des thermomètres, des baromètres, des manomètres. Constamment employé dans les laboratoires, il l'est également en thérapeutique.

MANGANÈSE

Il y a peu de temps que le manganèse est regardé comme métal industriel. Il a une cassure grise, il est dur et fragile.

Point de fusion (Herœus)	1.245°
Poids atomique	Mn = 55
Densité (Brummer)	7,1308 à 7,206

Jusqu'à ces dernières années, le manganèse était regardé comme fondant à très haute température (1.900°). M. Lewis a montré, en 1903, que du manganèse préparé par aluminothermie et renfermant 97 0/0 Mn fondait à 1.280°. Quelques mois après, M. Herœus, partant de manganèse à 99 0/0 de Mn, a obtenu 1.245°.

Le manganèse ne s'oxyde pas aisément à l'air ; il se recouvre d'une mince couche protectrice. Mais il s'oxyde très rapidement à température élevée. Il est inusité à l'état pur, mais il donne des alliages très intéressants avec le fer, le cuivre, l'aluminium, et il en améliore un grand nombre d'autres, notamment les bronzes, les laitons, les melchiors, etc.

ARGENT

Comme son nom l'indique, c'est un métal blanc susceptible d'acquérir un superbe poli ; il est extrêmement malléable et ductile ; on peut le réduire en feuilles dont l'épaisseur est moindre que 3/1000 de millimètre.

Point de fusion (Daniel Berthelot).......	962°
Poids atomique.......................	Ag = 107,63
Densité..............................	10,47 à 10,59

Il a des propriétés mécaniques intéressantes : Baudrimont a trouvé en effet qu'un fil d'argent de 1 millimètre carré de section a pour charge de rupture 28kg,5 à 0° ; 23kg,3 à 100°, et 18kg,5 à 200°.

L'argent ne s'oxyde qu'à très haute température dans une flamme d'oxygène.

Il est trop mou pour être utilisé seul.

OR

L'or est le métal le plus malléable et le plus ductile.

Il est d'un jaune brillant.

Point de fusion (Daniel Berthelot).......	1.064°
Poids atomique.......................	Au = 197,2
Densité..............................	19,50

L'or ne s'oxyde pas à l'air, il n'est attaqué par aucun acide simple, sauf par l'acide sélénique.

Il est trop mou pour être employé pur.

PLATINE

Le platine est un métal blanc ; il est très ductile, très malléable.

Wollaston obtint un fil ayant 1/1200 de millimètre de diamètre.

Point de fusion (Harker)...............	1.710°
Poids atomique (Seubert)..............	Pt = 194,46
Densité..............................	21,15 à 21,70

Il offre une ténacité comparable à celle du fer. Il ne s'oxyde à aucune température et n'est attaqué par aucun acide simple. Il est employé seul surtout pour faire des fils, planches et feuilles et certains appareils tels que ceux utilisés pour la concentration de l'acide sulfurique, des appareils de laboratoire, capsules, creusets, appareils électrolytiques, etc.

MAGNÉSIUM

Le magnésium est un métal d'un blanc superbe. Il est très tenace et ductile, surtout à la température d'environ 450°.

Point de fusion..........................	651°
Poids atomique..........................	Mg = 24,36
Densité (Deville et Caron)..................	1,75

Ce métal ne s'oxyde pas dans l'air sec, mais très facilement à l'air humide. Il bout à 1.100°.

Il brûle en donnant une flamme très vive, très riche en rayons ultra-violets.

Il n'est employé seul que pour les poudres photographiques.

CHROME

Le chrome est un métal d'un très beau blanc à cassure lamellaire.

Il est obtenu soit au four électrique (Voir chap. v), soit par aluminothermie (Voir p. 11). Il est très dur.

Poids atomique	Cr = 52,1
Densité	6,4 à 6,8

D'après Wöhler, le chrome serait magnétique à — 20°.

COBALT

Ce métal se rapproche beaucoup du nickel. Il est blanc, très malléable et assez tenace.

Point de fusion (Copaux)	1.530°
Poids atomique	Co = 59
Densité	8.513 à 8.880

Il est magnétique à la température ordinaire (cobalt α), mais il devient non magnétique à 1.140° (cobalt β) (Guertler et Tammann).

Il s'oxyde lentement à chaud. Il dissout le carbone à haute température; mais, par refroidissement, il l'abandonne à l'état de graphite.

VANADIUM

Ce métal est obtenu soit au four électrique, soit par aluminothermie[1] et encore ne prépare-t-on ainsi que des alliages fer-vanadium.

Il est d'un blanc brillant et très cassant.

Poids atomique	Va = 51,3
Densité	5,5

Il est inaltérable dans l'air à la température ordinaire.

TUNGSTÈNE

Ce métal est obtenu au four électrique ou par aluminothermie.

1. La réduction de l'acide vanadique par l'aluminium ne donne pas du vanadium pur, mais un alliage vanadium-aluminium.

Il est gris d'étain et très cassant.

Poids atomique	W = 184
Densité (Moissan)	18,7

Le tungstène n'est pas oxydé par l'air sec ou humide à la température ordinaire. Il s'oxyde rapidement au rouge en donnant de l'acide tungstique.

MOLYBDÈNE

Ce métal est obtenu au four électrique en partant de la molybdénite MoS^2 ou par aluminothermie. C'est un métal gris très dur.

Poids atomique	96
Densité (Moissan)	9,01

Le molybdène est inaltérable à l'air à la température ordinaire. Mais, si on le chauffe, il passe d'abord à l'état d'oxyde brun et enfin à l'état d'acide molybdique volatil.

URANIUM

Ce métal est obtenu soit par réduction de l'oxyde U^3O^8 par le charbon, soit par électrolyse du chlorure double UCl^4,2 NaCl (Moissan), soit enfin par décomposition de ce sel par le sodium.

Poids atomique	U = 239,5
Densité (Péligot)	18,4

PALLADIUM

C'est un métal blanc, qui est le plus fusible des métaux de la mine du platine.

Point de fusion	1.550°
Poids atomique	Pd = 106,0
Densité	11,4 à 12,1

Il est très malléable. Chauffé à l'air, il prend une teinte

légèrement bleutée par formation de l'oxyde PdO. Il absorbe de grandes quantités d'hydrogène (Graham) et forme même avec lui l'alliage Pd^2H (Troost et Hautefeuille).

RHODIUM

C'est un métal blanc, fragile.

Poids atomique........................	Rh = 103
Densité	12,10 à 12,26

Il est inattaquable par les acides. Son point de fusion est situé entre celui du platine et celui de l'iridium.

IRIDIUM

C'est un métal blanc d'acier très peu malléable.

Point de fusion........................	1.950° (?)
Poids atomique........................	Ir = 193
Densité..............................	22,42

Il est insoluble dans tous les acides et même dans l'eau régale faible.

Utilisé à l'état d'alliage avec le platine.

RUTHÉNIUM

Le ruthénium est un métal dur, fragile, à cassure cristalline (Joly).

Poids atomique........................	Ru = 101,7
Densité..............................	12,0

Ce métal se rapproche de l'étain par ses propriétés chimiques.

INFLUENCE DES IMPURETÉS

L'influence des impuretés sur les propriétés des métaux est des plus importantes. — Ne pouvant traiter complètement

cette question, nous nous contenterons d'en montrer l'intérêt pour le cuivre.

De très nombreuses recherches ont été faites en vue de préciser cette influence. Nous résumerons seulement l'étude la plus récente et la plus importante due à M. E.-A. Lewis, publiée dans *Engineering* (t. LXXVI, p. 753; 1903) et résumé dans la *Revue de Métallurgie* de février 1904.

M. Lewis classe les impuretés du cuivre en trois catégories d'après l'examen micrographique du métal, à savoir :

Premier groupe. — Métaux qui s'isolent en enveloppant les grains cristallins du cuivre, comme le plomb et le bismuth.

Deuxième groupe. — Métaux donnant avec une certaine quantité de cuivre des alliages qui forment des enveloppes semblables autour des grains de cuivre, comme l'arsenic, l'antimoine, l'étain et le zinc. On doit ranger dans la même catégorie les métalloïdes, oxygène, phosphore et soufre. Il faut encore diviser ce groupe en deux catégories, suivant que l'alliage-enveloppe se sépare ou non en deux constituants après sa solidification.

a) L'antimoine, le zinc et l'oxygène se séparent en deux constituants, cuivre et antimoniure de cuivre, cuivre et composé Cu^2Zn[1], cuivre et oxydule de cuivre.

b) L'arsenic, le phosphore et l'étain subsistent autour des cristaux de cuivre en donnant un seul alliage ou solution solide d'arsenic, d'étain et de phosphore dans le cuivre, où il est impossible de découvrir deux constituants. Le soufre se sépare à l'état de sulfure cuivreux.

Troisième groupe. — Métaux qui se dissolvent dans les cristaux de cuivre et ne s'en séparent pas, mais forment une solution solide, tels que le fer, le manganèse, l'aluminium et le nickel.

Voici comment M. Lewis caractérise les différents aspects micrographiques des cuivres purs et impurs.

1. L'existence de ce composé que parait affirmer M. Lewis est extrêmement douteuse. Voir chapitre IX.

Le cuivre pur fondu et refroidi doucement montre sous le microscope, après polissage et attaque par l'ammoniaque, des grains cristallins nettement limités séparés par des contours très fins.

Le cuivre pur allié à 0,2 0/0 de plomb ou de bismuth montre autour des cristaux de cuivre une légère enveloppe de ces deux impuretés formant un réseau continu dans toute la masse. Ces deux métaux rendent le cuivre tellement brisant que leur présence en petites quantités empêche de le laminer. Le bismuth est beaucoup plus dangereux encore que le plomb, mais il ne se rencontre pas habituellement dans les métaux industriels. La présence de 0,002 0/0 de bismuth suffit pour rendre fragile le cuivre électrolytique pur.

Le cuivre pur additionné de 0,2 0/0 d'arsenic, de phosphore ou d'étain montre, après polissage et attaque, des grains cristallins de cuivre entourés par une bordure qui ne peut être résolue en deux constituants, même avec les plus forts grossissements. Ces alliages se laminent facilement à chaud et sont très malléables à froid.

Le cuivre renfermant 0,2 0/0 d'antimoine, de zinc ou d'oxygène montre un réseau dans lequel on peut reconnaître facilement deux constituants. Une proportion semblable d'antimoine ou de zinc est déjà très nuisible et donne un mauvais laminage. Une proportion de 1 0/0 d'oxydule de cuivre peut exister dans le métal sans altérer sa malléabilité, pourvu qu'il n'existe pas d'autres impuretés en même temps. Le cuivre renfermant 0,2 0/0 de fer, de manganèse, d'aluminium ou de nickel ne montre aucun réseau particulier. La microstructure est semblable à celle du cuivre pur.

L'impureté la plus importante à déterminer au point de vue des propriétés du métal ordinaire raffiné est l'oxydule de cuivre. La présence de ce corps neutralise, dans une certaine mesure, l'action des autres impuretés; mais il faut que cette proportion soit convenable, et l'on admet alors que les impuretés en question soient oxydées par l'oxygène de l'oxydule. Le métal est de moins bonne qualité si la proportion d'oxydule

est trop faible ou trop forte ; mais cette explication du rôle de l'oxygène est tout à fait insuffisante.

M. Archbuts a observé récemment que le cuivre contenant une forte proportion d'arsenic peut renfermer des proportions de bismuth qui dénatureraient complètement un cuivre exempt d'arsenic. Cette observation a été le point de départ d'expériences dont il va être rendu compte.

Des lingots de 3 kilogrammes ont été laminés au rouge, et l'on a examiné la façon dont le métal se comportait pendant le laminage et ensuite à froid dans l'essai de flexion. Pour ces expériences on employait du cuivre électrolytique pur fondu dans un creuset de plombagine sous une couche de charbon de bois grossièrement pulvérisé qui empêchait l'oxydation, l'impureté était alors ajoutée dans le cuivre fondu et l'on agitait vivement avant de couler.

L'arsenic a donc la propriété de neutraliser dans une certaine mesure l'action nuisible du bismuth, du plomb et de l'antimoine ; au contraire, l'étain, le manganèse et l'aluminium exagèrent cette influence nuisible.

Dans le second rapport du Comité des Alliages, on trouve quelques analyses intéressantes de plaques de foyers de locomotives. Elles renfermaient en moyenne :

	Bonnes plaques	Mauvaises plaques
Plomb	0,08	0,23
Arsenic	0,54	0,08

La conclusion avait été que le cuivre de bonne qualité doit renfermer une certaine proportion d'arsenic et très peu de plomb. L'explication de ce fait, ajoute M. Lewis, doit être semblable à celle que l'on peut donner des propriétés mécaniques des laitons.

Le laiton renfermant moins de 63 0/0 de cuivre peut être travaillé à chaud parce qu'il renferme un alliage eutectique[1],

$$CuZn + xZn,$$

1. Nous verrons plus loin que ce n'est pas un eutectique, mais bien une solution solide.

qui tient en dissolution le plomb et l'étain. En l'absence de cet eutectique, le laiton pourrait être travaillé à froid, comme c'est le cas pour ceux de ses alliages qui renferment une plus forte teneur en cuivre. (Voir, pour plus de détails, le chapitre VIII.) De même, le bismuth et le plomb sont insolubles dans les cristaux de cuivre pur. L'arsenic forme avec le cuivre une solution solide d'arséniure de cuivre, qui se sépare autour des cristaux de cuivre sous forme d'un réseau et jouit de la propriété de conserver le bismuth et le plomb en solution solide, en annulant ainsi leur effet nuisible. Par contre, les métaux qui se dissolvent dans les cristaux de cuivre comme le manganèse et l'aluminium, exagèrent l'effet du plomb et du bismuth en laissant subsister le réseau sans consistance de plomb et de bismuth entre les cristaux de cuivre. Pour expliquer la neutralisation de l'action du soufre par le manganèse et l'aluminium, on peut supposer que la dissolution de ces deux corps dans les cristaux de cuivre leur donne la propriété qui n'appartient pas au cuivre pur de dissoudre le sulfure de ce métal.

Les expériences n'ont pas encore été étendues à la présence de l'oxygène[1] ; mais il résulte d'observations antérieures que l'oxygène agit de la même façon que l'arsenic. Il donne de l'oxydule de cuivre qui, de même que l'arséniure, produit un eutectique capable de maintenir les impuretés en solution, et la proportion d'oxyde de cuivre nécessaire varie avec la proportion des impuretés. S'il y a trop peu d'oxyde de cuivre, une certaine quantité des impuretés, du plomb, par exemple, restera à l'état libre. Si, au contraire, il y a un excès de ce corps, celui-ci exercera son action nuisible ordinaire.

Aujourd'hui, dans la fabrication des tubes de cuivre, on emploie quatre qualités différentes de métal :

1° Le cuivre ordinaire raffiné;

2° Le cuivre arsenical;

3° Le cuivre phosphoreux;

1. Voir chap. XI, *Cuivre et Oxygène : Travaux de M. Heyen et de M. Giraud*, p. 751.

4° Le cuivre renfermant 2 à 3 0/0 de nickel ou de manganèse.

1° Le cuivre raffiné de bonne qualité renferme 99,6 0/0 de cuivre, pas plus de 0,1 0/0 de plomb ou d'arsenic, de 0,05 0/0 d'antimoine, moins de 0,005 de bismuth et environ 0,1 à 0,2 0/0 d'oxygène, plus ou moins suivant la proportion de plomb et des autres impuretés ;

2° Le cuivre arsenical est un des meilleurs pour la fabrication des tubes à feu et des plaques de foyers; il présente les deux avantages suivants :

La résistance est plus grande, à la température ordinaire et à 250°, que celle du cuivre raffiné ; l'arséniure de cuivre rend moins nuisibles les petites quantités de plomb et de bismuth se trouvant dans le métal. Il est plus dur et plus tenace que le cuivre ordinaire, la proportion d'arsenic convenable dépend des autres impuretés. Pour le cuivre électrolytique, 0,25 0/0 d'arsenic suffisent; avec une teneur en plomb de 0,1 à 0,2 0/0, il faut au moins 0,6 0/0 d'arsenic. Dans tous les cas, la proportion de l'arsenic doit du moins être triple de celle du plomb et du bismuth ensemble. Du cuivre renfermant 0,75 0/0 d'arsenic peut contenir 0,03 0/0 de bismuth. La proportion d'oxygène dans un cuivre arsenical ne doit, dans aucun cas, dépasser 0,1 0/0.

3° Le cuivre phosphoreux ne peut être fabriqué qu'avec le cuivre de la meilleure qualité; il doit renfermer au moins 99,7 à 99,8 0/0 de cuivre ; il est plus dur que le cuivre raffiné ordinaire ; il doit renfermer de 0,05 à 0,01 de phosphore et pas plus de 0,04 d'oxygène ;

4° Le cuivre renfermant 2 ou 3 0/0 de nickel ou de manganèse est plus tenace que le cuivre ordinaire, et sa ténacité est plus élevée. Ces sortes de cuivre doivent être préparées avec des cuivres électrolytiques ou avec des cuivres extrêmement purs; ils ne doivent renfermer que des traces de plomb ou d'antimoine ; quand on les fabrique avec du cuivre commercial ordinaire, ils donnent des tubes se fendant assez facilement. Avec le nickel, les tubes étirés à froid peuvent se fendre au recuit.

IMPURETÉS AJOUTÉES	ESSAIS DE LAMINAGE À CHAUD	ESSAIS DE FLEXION
0,1 0/0 de plomb....	Fentes sur les angles.	Bon pliage, mais fentes superficielles.
0,1 0/0 de bismuth...	Fentes profondes sur les angles.	Casse brusquement sans plier.
0,1 0/0 d'antimoine..	Fentes sur les angles.	Pliage assez bon, mais fentes superficielles.
0,1 0/0 de zinc......	Fentes sur les angles.	Pliage médiocre.
0,1 0/0 de soufre.....	Fentes profondes.	Mauvais pliage.
0,6 0/0 d'arsenic..... 0,1 0/0 de plomb....	Petites fentes sur les angles.	Plie bien sans fente.
0,6 0/0 d'arsenic..... 0,05 0/0 de bismuth..	Fentes sur les angles.	Pliage assez bon.
0,6 0/0 d'arsenic..... 0,5 0/0 de bismuth...	Bon laminage.	Bon pliage.
0,6 0/0 d'arsenic..... 0,1 0/0 d'antimoine..	Fentes sur les angles.	Bon pliage.
0,6 0/0 d'arsenic..... 0,1 0/0 de zinc.......	Laminage assez bon.	Bon pliage.
0,6 0/0 d'arsenic..... 0,1 0/0 de soufre.....	Laminage assez bon.	Bon pliage.
0,5 0/0 d'étain....... 0,5 0/0 de bismuth...	Ne se lamine pas.	
0,5 0/0 d'étain....... 0,1 0/0 de plomb.....	Ne se lamine pas.	
0,5 0/0 de manganèse 0,5 0/0 de bismuth...	Ne se lamine pas.	
0,5 0/0 de manganèse 0,1 0/0 de plomb....	Mauvais laminage.	
0,5 0/0 de manganèse 0,1 0/0 de soufre.....	Bon laminage.	Bon pliage.
0,5 0/0 d'aluminium.. 0,05 0/0 de bismuth..	Ne se lamine pas.	
0,5 0/0 d'aluminium. 0,01 0/0 de plomb....	Ne se lamine pas.	
0,5 0/0 d'aluminium. 0,1 0/0 de soufre.....	Bon laminage.	Bon pliage.

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE I

SUR LE CUIVRE

Baubigny, *Comptes Rendus*, XCVII, 906 (*Point de fusion*).
Baudrimont, *Annales de Chimie et de Physique*, XXX, 304 (*Résistance*).
Demenge, *Congrès des Méthodes d'Essais*, Paris, 1900 (*Propriétés*).

SUR LE ZINC

Person, *Ann. de Chimie et de Physique*, XXIV, p. 136, 1848 (*Points de fusion*).
Rammelsberg, *Monatsh. pruss. akad.*, 225, 1880 (*Etats allotropiques*).
Riemsdyk, *Chem. News*, 30-32, 1869 (*Points de fusion*).
Rolley, *Ann. Chem. Pharm. Liebig*, 95, 294, 1855 (*Etats allotropiques*).
Violle, *Comptes Rendus*, CXIV, 720 (*Utilisation*).

SUR L'ÉTAIN

Cohen, *Recueil des travaux des Pays-Bas*, 1901 (*Transformation*).
Erdmann, *Société royale des Sciences de Leipzig* (*Id.*).
Von Foullon, *Jahrbüch der K. K. Geologischen Anstalt*, XXXIV, p. 337, 384, 1884 (*Id.*)
Fristche, *Comptes Rendus*, t. LXVII, p. 1106 (*Id.*).
Lewald, *Dingl. polyt. Journ.*, t. CXCVI, p. 369 (*Id.*).
Andemans, *Académie des Sciences d'Amsterdam*, 1871 (*Id.*).
Rammelsberg, *Deutsch. Chem. Gesellsch.*, 1870, p. 724, 1870 (*Id.*).
Van der Plaäts, *Comptes Rendus*, XCIX, 52 (*Poids atomique*) (*Id.*).

SUR LE NICKEL

Copaux, *Comptes Rendus*, CXL, 657, 1905 (*Propriétés*).
Pierre Curie, *Ann. Chimie et Physique*, V, 391, 1895 (*Sur le Magnétisme, Propriétés*).
Guertler et Thammann, *Journ. of the Society of Chemic. Industry*, XXIV, 137, 1905 (*Fusion et Magnétisme*).
Guillaume, *Archives des Sciences physiques et naturelles*, Genève, V, 255, 305, 1898 (*Propriétés*) ; — *Le nickel et ses alliages*, Gauthier-Villars (*Généralités*).
Moissan et Ouvrard, *Le nickel* (Collection Léauté), Gauthier-Villars (*Généralités*).
Schertel, *Ann. Ph. Chem. Wiedm.*, IV, 542, 1880 (*Point de fusion*).
Tombinson, *Chemical News*, 57, 1888 (*Sur le Magnétisme*).
Tourte, *Ann. Chimie et Physique*, LXXI, 103, 1889 (*Sur les propriétés physiques*).

Wedding et Rudeloff, *Société d'Encouragement à l'Industrie de Berlin*, 1897 (*Propriétés*).

SUR L'ALUMINIUM

Deville, *Comptes Rendus*, XXXVIII, 279 et 557, 1854 ; — *Comptes Rendus*, XLIII, 1187 (*Propriétés*) ; — *Ann. Chimie et Physique*, XLIII, 11, 1855 (*Densité*).

Ditte, *Comptes Rendus*, CX, 573, 1890 ; CXXVII, 919, 1898 ; et *t. CXXVIII*, p. 195, 1899 (*Propriétés*).

Frank, *Chemiker Zeitung*, 1898, p. 236 (*Réduction des oxydes*).

Gautier, *Comptes Rendus*, CXXXIII, 109, 1896 (*Point de fusion*).

Goldschmidt, *Revue générale de Chimie pure et appliquée*, janvier 1900 (*Aluminothermie*).

Green et Wahl, *Berichte Refer.*, 1893, t. XXVI, p. 980 (*Réduction des oxydes*).

Guillet, *Bulletin de la Société d'Encouragement*, août 1902 (*Alliages d'aluminium*); — *Contribution à l'étude des alliages d'aluminium*, Thèse de doctorat, 1902 (*Aluminothermie*) ; — *Génie civil*, 20 octobre 1900 (*Aluminothermie*) ; —*Principes d'électrochimie et d'électrométallurgie*, Baillière, éditeur, 1903 (*Aluminothermie*).

Hélouis, Société d'Encouragement, 1896, p. 104 (*Réduction des oxydes*).

Héroult, *l'Aluminium à bon marché* (Congrès de Métallurgie, 1900) (*Généralités*).

Matignon, *Moniteur Scientifique* (*l'Aluminium à l'Exposition de* 1900, II, 490), et *la Métallurgie à base d'aluminium*, 1900, I, 353.

Minet, *l'Aluminium*, Bernard Tignol (*Généralités*).

Moissan, *Comptes Rendus*, 1899, CXXII, 1301 et 1302 (*Réduction des oxydes*).

Moissonnier, *l'Aluminium*, Gauthier-Villars, 1903 (*Généralités*).

Tessier, *Comptes Rendus*, 1861, LII, 931 (*Réduction des oxydes*).

Troost, *Comptes Rendus*, 1866, LIX, 109 (*Id.*).

Wœhler, *Annalen der Chem. Pharm.*, 1856, CIV, 118 (*Réduction des oxydes*); — 1860, CXIII, 248, et CXV, 202 (*Id.*).

SUR LE BISMUTH

Gautier, Société d'Encouragement, octobre 1896 (*Point de fusion*).

Ludeking, *Ann. Phys. Chem.*, XXXIV, 21 (*Densité*).

Von Riemsdyk, *Chemical News*, XX, p. 32 (*Volatilité*).

SUR L'ANTIMOINE

Bongartz, *D. Chem. G.*, XVI, 1942.

Cooke, *Bull. Société Chimie*, XXX, 337 ; XXXV, 66 (*Poids atomique*).

Rol. Gosselin, Société d'Encouragement, octobre 189 (*Point de fusion*).

SUR LE CADMIUM

Berthelot (Daniel), *Comptes Rendus*, CXXXI, 380, 1900, et CXXXIV, 705, 1902 (*Point d'ébullition*).
De la Rive, *Comptes Rendus*, LXVII, 698, 1863 (*Sur les propriétés mécaniques*).
Nies et Winkelmann, *Annal. Ph. Chem. Poggendorff*, XIII, 43, 1881 (*Point de fusion*).
Ferson, *Ann. de Chimie et Physique*, XXIV, 273, 1848 (*Id.*).
Wertheim, *Ann. de Chimie et Physique*, XII, 385, 1844 (*Coefficient d'élasticité*).

SUR LE MERCURE

Volkmann, *Poggendorf. Ann.*, 1881, p. 209 (*Densité*).

SUR LE MANGANÈSE

Glatzel, *Ber. Chem. Gesell.*, XXII, 2857, 1889 (*Magnétisme*).
Jordan, *Comptes Rendus*, LXXXVI, 1374, 1878, et CXVI, 752, 1893 (*Volatilisation*).
Lewis, *Journal Society of Chemical Industry*, 28 mai 1902 (*Point de fusion*).
Moissan, *Ann. Chimie et Physique*, IX, 133, 1896 (*Volatilisation*).

SUR L'ARGENT

Baudrimont, *Comptes Rendus*, XXXI, 115 (*Propriétés mécaniques*).
Meyer et Seubert, *D. Chem. G.*, 18, 1098 (*Poids atomique*).

SUR L'OR

Daniel Berthelot, *Annales de Physique et de Chimie* (*Point de fusion*).

SUR LE PLATINE

Debray, *Bull. Société de Chimie*, XXVII, 146 (*Propriétés*).
Deville et Debray, *Comptes Rendus*, LXXXI, 839 (*Point de fusion*).
Harker, *Engineering*, LXXIX, 367, 1905.
Seubert, *Liebig s Ann. Chem.*, CCVII, 1 (*Poids atomique*).

SUR LE MAGNÉSIUM

Boudouard, Société d'Encouragement, août 1902 (*Point de fusion*).
Ditte, *Comptes Rendus*, LXXIII, 108, 1871 (*Point d'ébullition*).

SUR LE CHROME

Baubigny, *Comptes Rendus*, XCVIII, 146 (*Poids atomique*).

SUR LE COBALT

Becquerel, *Ann. Chim. Phys.*, XVI, 227, 1879 (*Magnétisme*).
Copaux, *Comptes Rendus*, CXL, 657, 1905.
Guertler et Thamann, *Journ. of the Society of Chemical Industry*, XXIV, 137, 1905 (*Magnétisme et fusion*).
Moissan, *Le four électrique*, Paris, Steinheil, 1897 (*Absorption du carbone*).
Pictet, *Comptes Rendus*, LXXXVIII, 1317, 1879 (*Point de fusion*).
Rammelsberg, *Ann. Phys. Chem. Poggendorf*, LXXVIII, 53, 1849 (*Densité*).
Schmitz, *Proc. Royal Society*, LXXII, 177, 1903 (*Magnétisme*).
Turner, *Chemical News*, LV, 179, 1887 (*Dureté*).

SUR LE VANADIUM

Moissan, *Comptes Rendus*, CXVI, 1225, 1893 (*Préparation*).
Nicolardot, *le Vanadium* (collection Léauté) (*Généralités*); — *Revue d'Artillerie*, mars, avril, mai 1904 (*Propriétés et extraction*).
Roscoë, *Proc. Royal Society*, XVI, 223, 1867 (*Poids atomique*).

SUR LE TUNGSTÈNE

Bedford, *Note Sheffield*, 1893 (*Généralités*).
Castner, *Stahl und Eisen*, XVI, 1896, 517 (*Id.*).
Defaqz, *Comptes Rendus*, CXXIII, 1896 (*Préparation*) ; — Thèse de doctorat, Gauthier-Villars, 1901 (*Id.*).
Delépine, *Comptes Rendus*, 1900 (*Préparation*).
Hadfield, *Iron and steel Institute*, septembre 1904 (*Densité et propriétés*).
Hallopeau, Thèse de doctorat, n° 1026, p. 27 (*Préparation*).
Moissan, *Comptes Rendus*, CVI, 225 (*Préparation*) ; — CXXIII, 13 (*Préparation*).
Rammelsberg, *Ann. Chim. Phys.*, 3e série, I, 9 (*Fusion*).

SUR LE MOLYBDÈNE

Guichard, Thèse de doctorat, Gauthier-Villars, 1902.
Loth. Meyer, *Liebig's Ann. Chem.*, CLXIX, 360 (*Poids atomique*).
Moissan, *Comptes Rendus*, CXX, 1320 à 1895 (*Préparation*).
Rammelsberg, *Deustch. Chem. Gesell.*, 1877, 1776 (*Propriétés*).

SUR LE PALLADIUM

Deville et Debray, *Ann. de Chim. et de Phys.*, LVI, 385 (*Propriétés*).

SUR LE RHODIUM

Deville et Debray, *Comptes Rendus*, LXXVIII, 2782 (*Propriétés*).

CHAPITRE II

GÉNÉRALITÉS SUR LES ALLIAGES

DÉFINITION DE L'ALLIAGE

L'alliage est le produit de l'union de deux ou plusieurs corps dont l'un au moins est un métal.

On distingue les alliages binaires formés de deux corps, ternaires formés de trois corps, etc. L'industrie utilise parfois des alliages très complexes, formés de cinq, six corps et même plus.

Certains des constituants sont ajoutés souvent en quantités infimes ; ils n'ont même quelquefois qu'un rôle épurateur : tel le phosphore dans les bronzes : on cherche à introduire une quantité suffisante de ce corps pour réduire les oxydes contenus dans le bain et telle qu'il n'en reste que des traces après la coulée.

CONSTITUTION DES ALLIAGES

Nous avons étudié dans le premier volume, *Étude théorique des alliages métalliques*, les différentes méthodes permettant de connaître la constitution d'un alliage. Nous n'avons pas à y revenir ici. Disons seulement que, lorsque deux métaux — pour ne considérer que le cas, le plus simple, d'alliages binaires — sont mis en présence, il peut se présenter les différents cas suivants :

1° Les métaux ne se mélangent pas. Il n'y a pas d'alliage possible ;

2° Les métaux se mélangent mécaniquement ;

3° Les métaux se dissolvent l'un l'autre et forment des solutions solides[1];

4° Les métaux se présentent sous des états allotropiques différents;

5° Les métaux donnent naissance à des compositions définies qui ne sont solubles ni dans les métaux constituants, ni dans une autre combinaison;

6° Les métaux donnent naissance à une combinaison qui se dissout dans l'un des métaux constituants ou dans l'une des combinaisons;

7° Les métaux sont isomorphes et cristallisent ensemble.

Les méthodes que nous avons décrites dans le premier livre permettent de préciser cette constitution. Au cours de ce volume nous donnerons, dans chaque paragraphe intitulé : *Étude théorique*, les différents travaux qui ont été exécutés dans ce sens sur les alliages.

DIVERS MODES DE PRÉPARATION DES ALLIAGES

Il faut dans la fabrication des alliages distinguer trois périodes :

I. La fusion ayant pour but d'amener à l'état fondu les divers métaux rentrant dans l'alliage;

II. La coulée, opération qui consiste à verser l'alliage fondu dans des moules qui diffèrent avec la troisième période ;

III. Le traitement de l'alliage coulé, opération par laquelle on amène l'alliage à sa forme commerciale définitive: pièces moulées; barres laminées, étirées, etc. et, sous un état défini (recuit, écroui, etc...).

I. — FUSION DES ALLIAGES

La préparation de l'alliage à l'état fondu peut avoir lieu par divers procédés que nous décrirons rapidement :

1. Ce cas est plus fréquent qu'on ne semble l'avoir cru jusqu'ici ; il faut ajouter que c'est l'un des plus importants pour l'industrie ; en effet, la solution solide, qui peut et doit être homogène, a, de plus, la supériorité, sur toute autre constitution, de varier progressivement de propriétés.

A. **Fusion simultanée des corps constituants.** — C'est la méthode la plus générale, dont le principe est le suivant : on fond le métal le moins fusible et on y incorpore les autres métaux dans l'ordre de leur fusibilité en terminant par celui dont le point de fusion est le plus bas.

Cependant on déroge souvent à cette règle ; nous citerons le cas où l'on veut faire l'affinage d'un métal par le phosphore, l'aluminium, le manganèse ou tout autre réducteur ; il est de toute évidence que cette addition aura lieu juste avant la coulée. De même, s'il entre dans un alliage un métal volatil, il arrivera fort souvent que l'on introduira ce métal quelques instants seulement avant de retirer le creuset du four.

Enfin il est bon de signaler que souvent, au lieu de partir de métaux, l'on utilise des alliages, qui présentent une moindre volatilisation, une plus grande facilité de fusion, de dissolution, etc.

C'est ainsi que, pour faire les maillechorts, on introduit rarement le nickel à l'état métallique, mais bien à l'état d'alliage cuivre-nickel, préalablement préparé. De même on n'introduit jamais de phosphore dans les alliages de cuivre, mais bien du phosphure de cuivre. Cette remarque est faite en dehors de la considération si importante pour certaines industries de l'utilisation des déchets.

B. **Production de l'un des métaux en présence des autres.** — Soit le métal A à allier à un autre métal B. — Le métal A est pris à l'état d'oxyde, sulfure, sels, etc., et mis en présence du métal B. On fait subir au mélange un traitement tel que le métal A se produise et s'allie au métal B.

Nous citerons, comme exemple, l'ancienne méthode de préparation des laitons, qui consistait à réduire de l'oxyde de zinc par le charbon en présence de cuivre ; la fabrication du ferro-silicium au four électrique, dans laquelle on réduit le quartz par le charbon à la haute température de l'arc et en présence de fer : le silicium produit est au fur et à mesure absorbé par le fer.

La méthode d'obtention de la fonte, alliage de fer et de carbone relativement riche en ce corps, relève, en somme, du même procédé. L'oxyde de fer est réduit par l'oxyde de carbone et le carbone, et le fer ainsi produit dissout ce dernier corps.

C. **Production simultanée des différents métaux en partant de leurs composés.** — Les métaux sont pris à l'état d'oxydes, de sels, etc. ; ceux-ci sont mélangés avec un ou plusieurs produits, tels que l'on puisse, dans certaines conditions, produire les métaux qui s'allient.

C'est ainsi que l'on obtient au haut fourneau les alliages spéciaux, tels que les ferro-manganèses, ferro-siliciums, etc. Le mélange des oxydes de fer et de manganèse, ou de fer et de silicium, est réduit par le charbon, et les corps qui ont pris naissance s'allient.

De même, on prépare, à l'heure actuelle, des alliages de nickel-vanadium en mélangeant l'oxyde de nickel et l'acide vanadique avec un réducteur. On produit donc simultanément le nickel et le vanadium qui forment alliage.

Enfin la méthode récente de l'aluminothermie permet d'arriver à la préparation d'alliages par le même principe. Suivant les indications que nous avons données plus haut, les oxydes des deux métaux à allier sont mélangés à de l'aluminium en grains. La cartouche de bioxyde de baryum et d'aluminium provoque la réaction ; les corps mis en liberté s'allient.

D. **Production des alliages par compression.** — Cette méthode qui, disons-le de suite, n'est nullement industrielle, a été utilisée par M. Spring, qui a préparé des alliages en comprimant fortement de la poudre des différents métaux constituants.

Il commença d'abord par déterminer les pressions nécessaires pour agglomérer la limaille des divers métaux de façon à ne plus trouver aucune trace des grains primitifs.

Il a trouvé que ces pressions étaient les suivantes :

Plomb	2.000 atmosphères
Étain...........	3.000 —
Zinc............	6.000 —
Antimoine	6.000 —
Aluminium	6.000 —
Bismuth........	5.000 —
Cuivre..........	5.000 —

Appliquant ce principe à plusieurs métaux en poudre soumis simultanément à une forte pression, il put préparer différents alliages. L'un d'eux avait pour composition :

Bi..........................	15 0/0
Pb..........................	8 0/0
Sn..........................	4 0/0
Cd..........................	3 0/0

E. **Production des alliages par voie électrolytique.** — On peut produire des alliages en effectuant un dépôt électrolytique de plusieurs métaux ; on arrive ainsi à recouvrir les objets de couches de laiton, etc. Ces dépôts, qui relèvent de la galvanoplastie, sont trop connus pour qu'il nous soit nécessaire d'insister.

F. **Production des alliages par affinage d'alliages obtenus dans d'autres opérations.** — De toutes les méthodes données, c'est assurément la plus répandue après les premières décrites.

Qu'il nous suffise de rappeler que les aciers sont obtenus par affinage de la fonte (procédés Martin, Bessemer), que les ferrotungstènes, ferrochromes, etc., à faible teneur en carbone, sont préparés en affinant des alliages carburés en présence d'oxydes, etc., etc.

G. **Production des alliages par cémentation.** — Nous donnerons plus loin quelques détails sur cette opération; on sait que le fer peut se transformer en acier sous l'influence du carbone ; on applique aussi industriellement la méthode de la cémentation à la préparation des alliages cuivre-zinc. Des

expériences que nous n'avons pas encore terminées nous ont nettement prouvé que le cuivre et l'étain se cémentaient.

H. **Production des alliages par réaction chimique.** — Enfin les alliages sont parfois obtenus par une réaction chimique autre que celle déjà décrite.

C'est ainsi que Rose a pu préparer le phosphure de cuivre Cu^6P^2 en traitant le phosphure tricuivrique par l'hydrogène à haute température

$$2Cu^3P^2 + 6H = PH^3 + Cu^6P^2,$$

que M. Lebeau a pu obtenir au four électrique le siliciure de fer SiFe et le siliciure de cobalt SiCo en faisant réagir le fer et le cobalt sur un excès de siliciure de cuivre.

DES FOURS UTILISÉS DANS LA PRÉPARATION DES ALLIAGES

Les principaux fours utilisés dans la préparation des alliages sont :

1° Les fours à creusets à tirage naturel, connus surtout sous le nom de *fours potagers;*

2° Les fours à creusets soufflés ;

3° Les fours à creusets chauffés au gaz, à l'huile, au pétrole, etc. ;

4° Des fours spéciaux dont les principaux sont le four Piat, le four Rousseau, le four Leifert, le four Charlier, etc. ;

5° Le cubilot ;

6° Les fours à réverbère ;

7° Les fours électriques qui se divisent en deux classes : les fours à électrodes, les fours sans électrodes ;

8° Les appareils spéciaux, dont les descriptions seront données plus ou moins détaillées au cours de cet ouvrage (hauts-fourneaux, convertisseurs, fours à cuves, etc.) et sur lesquels nous n'insisterons pas actuellement.

Les *fours à creusets à tirage naturel* sont constitués géné-

ralement par une chambre à section carrée de 0m,30 à 0m,40 de côté et 0m,90 à 1m,20 de profondeur ou à section circulaire de 0m,40 à 0m,45 de diamètre. Cette chambre est garnie de briques réfractaires; un carneau partant du haut la relie à la cheminée, soit directement, soit indirectement par un carneau général desservant tout un massif de fours. Une grille placée dans le bas soutient le combustible, un couvercle en terre réfractaire permet de venir fermer la cavité du four.

L'avantage du four à creusets à tirage naturel réside essentiellement dans sa simplicité et dans la facilité des réparations. Mais il présente certains inconvénients que nous indiquons plus loin.

Les *fours à creusets soufflés* se rapprochent beaucoup des précédents ; mais ici il n'y a plus de carneaux d'appel, ni de cheminée de tirage; au-dessous de la grille se trouve seulement un conduit amenant de l'air sous pression.

Ces fours ont l'avantage de supprimer la cheminée, ce qui permet des installations beaucoup plus simples, mais nécessite un ventilateur. Ils peuvent fournir des températures plus élevées et des fusions plus rapides que les fours à tirage naturel.

Percy (*Métallurgie*, p. 201) a donné un exemple que nous croyons bon de citer : il s'agit d'un four utilisé à l'Hôtel de la Monnaie de Berlin et qui est représentée figure 1. A est une chambre de briques réfractaires ayant une grille plate ordinaire composée de barreaux de fer et une autre grille dans laquelle les barreaux sont placés en échelons *b*. Avec une semblable grille, on peut employer le poussier de charbon qui ne tiendrait pas sur une grille ordinaire. La surface de la grille par l'arrangement en échelons est considérablement augmentée et offre un grand espace pour l'admission de l'air. Les deux ouvertures *d* et *e* sont fermées par des portes en fer. Un courant d'air est introduit sous les grilles par le tube *f*. Le combustible est chargé par l'ouverture *g* qui est fermée avec un couvercle en fer, et par un registre à glissière *h*. Les gaz, principalement de l'oxyde de carbone, passent à travers le tube K

pourvu d'une valve régulatrice *l* et s'échappent en *m*. Immédiatement en avant de l'ouverture *m* et s'étendant à travers le four, se trouve un tube en fer *n*, par lequel arrive de l'air. L'oxyde de carbone brûle dans cette région, et la chaleur est communiquée au four dans lequel est placé le creuset. Afin de représenter dans la même section verticale le gazogène et le four à fusion, il a été nécessaire de déplacer le four à fusion de sa position réelle : il se trouve à côté du gazogène. L'air est insufflé par un petit ventilateur à travers les tubes *f* et *n*, munis de valves régulatrices.

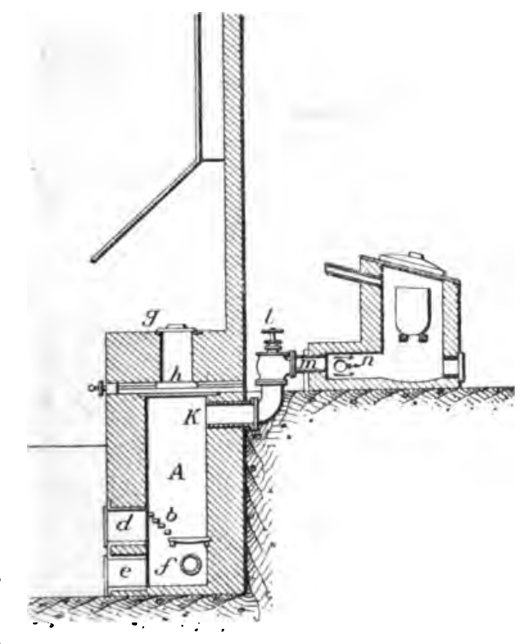


Fig. 1. — Four à creusets soufflés de la Monnaie de Berlin.

Mais ces sortes de fours présentent de gros inconvénients, que nous ne pouvons passer sous silence : les manipulations sont difficiles, aussi bien celles pour mettre le creuset vide au centre du four que celles pour retirer le creuset plein de métal en fusion, au moment de la coulée.

Ce sont ces inconvénients que l'on a cherché à éviter dans les deux types de fours spéciaux que nous allons décrire.

Le type Piat comporte plusieurs sortes de fours : des fours oscillants portatifs et des cubilots-creusets.

Les fours oscillants portatifs sont en tôle, de forme carrée (*fig.* 2 et 3) ; une ceinture en acier, qui porte deux tourillons, les embrasse sur tout leur pourtour à une hauteur convenable

pour que le four puisse basculer aisément dans un sens comme dans un autre à l'aide d'un levier. Un orifice en forme de

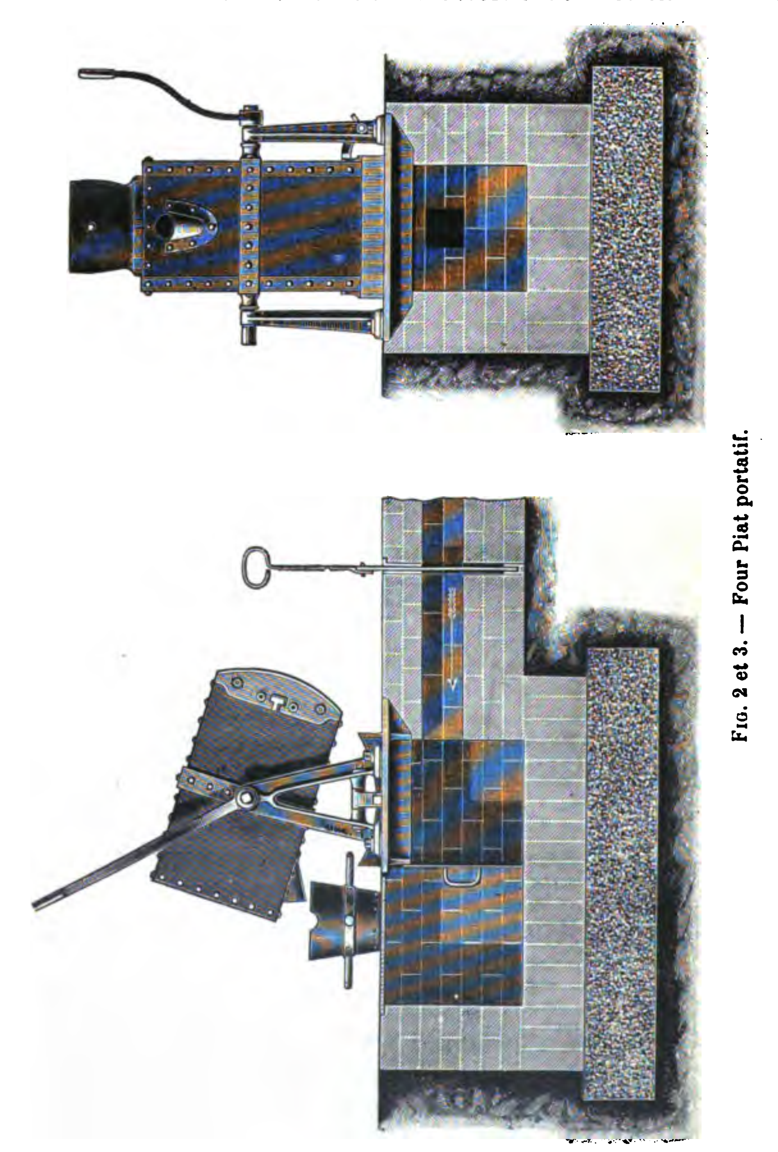


Fig. 2 et 3. — Four Piat portatif.

bec est ménagé sur la face de devant pour la sortie du métal liquide.

Une cornière, qui reçoit au dessus la garniture intérieure du four, en forme la base. Ces cornières portent à l'intérieur des renflements dans lesquels sont ajustés deux forts barreaux ronds destinés à recevoir la partie de grille en acier qui porte le *fromage* et quatre ou six barreaux. On laisse à ces barreaux une certaine mobilité qui permet de les rapprocher et de les éloigner afin de faciliter le décrassage et la sortie des scories.

Une pièce de plombagine appelée *fromage* reçoit le creuset qui s'ajuste au bec du four contre une pièce en terre réfrac-

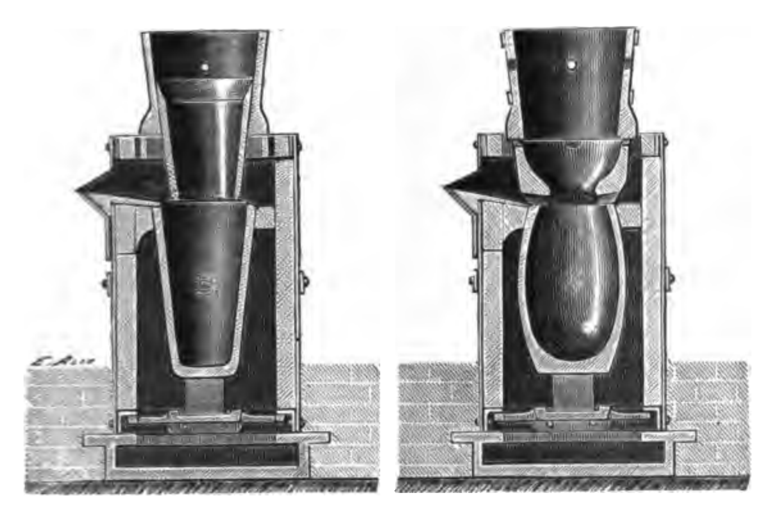


FIG. 4 et 5. — Fours Piat avec rehausse.

taire spéciale. Cette pièce en terre fait partie de la cheminée du four dans laquelle elle est encastrée (*fig.* 4 et 5).

A la partie diamétralement opposée au bec du four, on pose un *coin* en terre réfractaire contre la paroi pour forcer le creuset à rester en place. Le four est ainsi prêt à recevoir le combustible. Le creuset une fois posé sur le fromage est relié au bec du four avec un peu de sable réfractaire mélangé de plombagine et il arrive qu'au premier feu le bec et le creuset ne font plus qu'un.

Après chaque fonte, avant de faire une nouvelle charge de coke, il faut ringarder dans les coins pour faciliter la descente

du vieux coke et faire tomber les cendres provenant de la fusion précédente. Une fois la coulée terminée, avant de remettre le four en place, il faut, toutes les deux ou trois fontes, faire le nettoyage de son feu. A cet effet, on laisse le four suspendu et, le faisant osciller sur ses tourillons à l'aide d'un ringard, on écarte successivement tous les barreaux pour faire tomber les crasses ou scories ; il faut avoir soin dans cette opération de toucher le moins possible le creuset et le fromage.

Le vent qui arrive sous le creuset doit avoir une pression de 12 à 18 centimètres. Un perfectionnement donné à ces fours consiste dans l'emploi de rehausse où l'on introduit le métal, en lieu et place du creuset (*fig.* 4 et 5).

La rehausse qui se rapproche beaucoup d'un creuset est percée d'un trou au centre du fond ; de plus, sur le pourtour et à hauteur convenable, elle comporte plusieurs ouvertures. (*fig.* 4). La forme et les dimensions de ces ouvertures ont une certaine importance. Un trou percé dans les deux parois à la partie supérieure sert à mettre en place la rehausse sur le four et à l'enlever au moyen d'un ringard.

Le métal à fondre est placé dans cette rehausse. Dès le commencement de l'action du vent dans l'intérieur du four les flammes, qui n'ont pas d'autres issues, viennent passer avec force par les ouvertures du pourtour de la rehausse et forment un puissant chalumeau qui chauffe la masse de métal et la fond très vite.

MM. Piat affirment que l'on arrive avec ce système à fondre 100 kilogrammes de bronze en quinze à seize minutes et avec une moyenne de coke qui ne doit pas dépasser en marche normale 13 0/0.

Lorsque la fusion est terminée, on enlève la rehausse, on s'assure que le creuset poussé par le coin réfractaire s'ajuste bien ; le métal étant bien à point, on arrête le vent ; on nettoie ensuite parfaitement le bec lui-même avec le soufflet. Le dessus du bain est écumé à la manière ordinaire, et l'on peut procéder à la coulée. Pour les laitons, la rehausse n'est pas percée de trous (*fig.* 5) ; elle n'a pour but que d'augmenter la

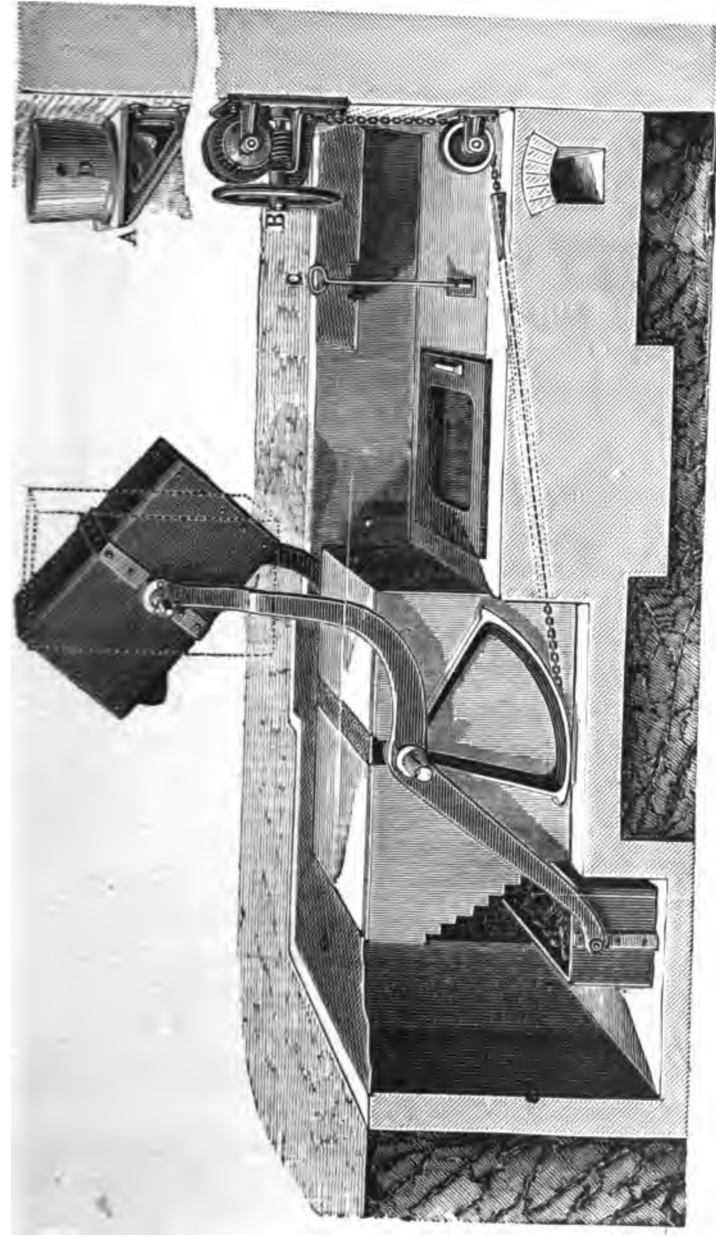


Fig. 16. — Four Piat, installation générale.

capacité du creuset. La rehausse des bronzes donnerait avec ces alliages une évaporation trop grande.

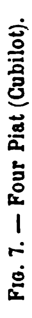


Fig. 7. — Four Piat (Cubilot).

Les fours peuvent être montés sur des bâtis spéciaux qui facilitent beaucoup la coulée (*fig*. 2, 3 et 6).

Le cubilot-creuset (*fig.* 7) est utilisé plus spécialement à la fusion de la fonte, tandis que les appareils que nous venons de décrire servent surtout pour les alliages de cuivre.

Le cubilot est de dimensions restreintes ; il a le fond percé d'un trou et vient se superposer sur le four. Une colonne creuse qui le supporte sert également pour la conduite du vent. Une vis soulage le poids du four et permet, une fois la fusion terminée, de lever légèrement le petit cubilot, qui tourne alors facilement autour d'une douille.

La fonte est introduite dans le cubilot par charge alternant avec le coke, comme dans les cubilots ordinaires ; on souffle simultanément dans le cubilot et sous le four portatif, et il faut avoir soin de ne commencer à charger qu'au bout de dix minutes environ, soit quand le fond du cubilot a bien eu le temps de s'échauffer.

MM. Piat déclarent que cet appareil permet de fondre 100 kilogrammes de fonte aciéreuse en trente minutes avec une dépense de 30 à 40 0/0 de coke. Pour des fontes siliceuses, la quantité de coke descend à 16 0/0, soit presque la quantité normale dépensée dans les grands cubilots, allumages compris. On peut aussi utiliser ces cubilots pour lingoter les limailles de bronze, tout en les débarrassant du zinc contenu.

Quelques détails complémentaires intéressants ont été donnés par M. Irresberger dans le *Stahl und Eisen* du 1er février 1904, sous le nom de four Piat-Baumann ; il s'agit surtout de la distribution de l'air comprimé et d'un nouveau dispositif à bascule, de maniement plus aisé, d'après l'auteur, que le modèle ordinaire.

Le *four Rousseau*, connu sous le nom de *four gazogène amovible*, se compose de deux parties : le gazogène et le creuset.

La figure 9 est une coupe longitudinale du four ;

La figure 8 est une élévation latérale vue du côté du mécanisme de commande.

La figure 10 est une coupe horizontale.

Le bassin (ou cuvette) 4 qui reçoit le métal à fondre est cir-

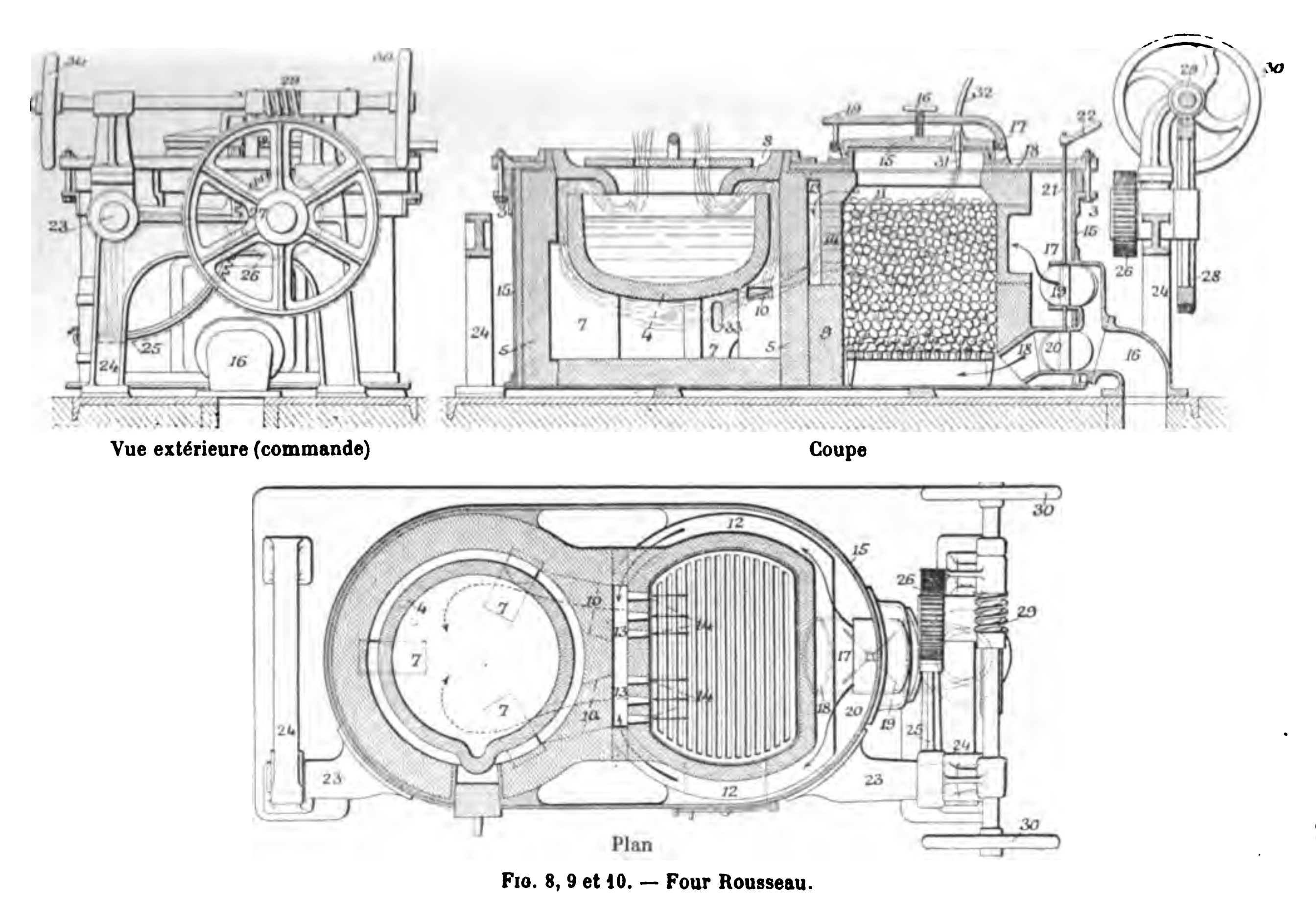
culaire à fond sphérique ou elliptique pour présenter une grande résistance et simplifier sa fabrication; ce bassin est logé dans une capacité 5 en matière réfractaire dont le fond est muni d'une sole; il est porté par des cales 7 encastrées dans la paroi de la capacité 5, laquelle est munie à sa partie supérieure d'une couronne 8 de forme convenable pour que la partie inférieure redescende vers l'intérieur du bassin 4, en réservant entre elle et ce dernier un jeu annulaire de section suffisante pour le passage des gaz de la combustion et pour obliger ceux-ci à lécher la surface du métal liquide avant de s'échapper du four.

Cette couronne 8 est légèrement échancrée en regard du trou de coulée obturé pendant la fusion par un tampon comme à l'ordinaire.

Le foyer 9 est accolé à la capacité 5 et ne communique avec elle que par les conduits 10, 10, qui livrent passage au gaz; mais ces conduits sont disposés à une hauteur telle que, si le bassin 4 vient accidentellement à se vider dans la capacité, le niveau du métal n'atteigne jamais le niveau des conduites 10.

Le foyer 9 est surmonté d'une chambre de combustion 11, autour de laquelle est réservé un conduit 12 qui débouche de chaque côté, à sa partie supérieure, dans un conduit 13, réservé entre les capacités 5 et 11; la chambre de combustion 11 communique directement avec le conduit 13, par des orifices 14, 14, en nombre convenable pour assurer la section suffisante au passage des gaz dégagés par le foyer; ce conduit 13 communique par les conduits 10 avec la capacité 5.

La chambre 11 est fermée par un couvercle 15 serré par une vis 16 engagée dans un levier 17 articulé sur la plaque métallique 18 formant le dessus du four; ce levier peut être engagé à son extrémité dans un anneau 19 articulé sur la plaque 18 et l'empêchant de se relever sous la pression exercée par la vis 16; il est facile d'enlever le couvercle 15 en dévissant cette vis 16 et en dégageant l'anneau 19 du levier 17, ce qui se fait très rapidement.



Vue extérieure (commande)

Coupe

Plan

Fig. 8, 9 et 10. — Four Rousseau.

Le foyer 9-11 et la capacité 5 sont tous deux logés dans une même enveloppe de tôle 15, à l'intérieur de laquelle peut circuler l'air nécessaire à la combustion. A cet effet, aboutit à cette enveloppe un conduit 16 qui se divise en deux parties par des tubulures appropriées 17, 18 ; la tubulure supérieure débouche à l'intérieur de l'enveloppe 15, qui se trouve ainsi rafraîchie par l'air, tandis que celui-ci s'échauffe, et la tubulure inférieure 18 débouche sous la grille du foyer (*fig.* 9). Chacune de ces tubulures est munie d'une valve papillon 19, 20; ces deux papillons sont montés sur un même axe 21 portant extérieurement une poignée de commande 22, et ils sont disposés à angle droit l'un par rapport à l'autre, de telle façon que, lorsque l'on tourne la poignée 22, on ferme l'un des conduits et on ouvre l'autre.

Sur l'enveloppe 15, sont fixés sur le même axe deux tourillons 23, 23, portés par des supports 24, 24 fixés sur le socle du four, lequel peut être muni d'anneaux pour faciliter le transport de l'appareil. L'un des tourillons 23 porte un secteur denté 25 engrenant avec un pignon denté 26 monté sur un arbre 27 ; cet arbre porte une roue dentée 28 engrenant avec une vis sans fin 29 que l'on peut manœuvrer au moyen de l'un des deux volants-manivelles 30, calés aux extrémités de l'arbre portant cette vis.

On conçoit qu'en faisant tourner l'un de ces volants en sens convenable, on transmette au secteur denté 25, et par conséquent à l'ensemble du four, un mouvement de rotation permettant de déverser le métal fondu contenu dans le bassin 4 dans une poche, une lingotière ou un moule.

Sur le couvercle 15 est disposée une tubulure 31 débouchant à l'intérieur de la chambre de combustion 11 et reliée par un tuyau flexible 32 à un réservoir de pétrole ou de tout autre hydrocarbure, de façon à envoyer dans le foyer un jet d'hydrocarbure liquide qui s'enflamme au contact des gaz chauds et ajoute son effet calorifique puissant à celui du combustible du foyer 9.

Les gaz dégagés dans le foyer 9 s'élèvent dans la chambre

de combustion 11, passent par les orifices 14, les carneaux 13 et 10 pour se répandre dans la capacité 5 où la circulation leur est facilitée par des orifices 33 pratiqués dans les cales 7. L'air envoyé par le conduit 16 afflue, d'une part, par la tubulure 18, sous la grille du foyer 9, et, d'autre part, par la tubulure 17 autour de la chambre 11, d'où il vient par les carneaux 12 dans le conduit 13 où il y rencontre les gaz s'échappant par les orifices 14, auxquels il apporte l'oxygène nécessaire à la combustion complète.

Dans la capacité 5 les gaz s'élèvent en contournant le bassin 4 qu'ils chauffent activement, puis suivent la paroi inférieure de la couronne 8 pour venir lécher le métal contenu dans le bassin 4, pour le chauffer directement et s'échapper ensuite, comme le représentent les flèches de la figure 9.

Lorsque la quantité de gaz produits est trop grande pour la quantité d'air et qu'il sort du four de l'oxyde de carbone, on tourne la poignée 22, de façon à ce que le papillon 20 ferme davantage le conduit 18 pour diminuer la quantité d'air envoyée dans le foyer et que le papillon 19 ouvre d'une quantité correspondante le conduit 18 pour accroître le volume d'air envoyé dans le conduit 13, pour fournir l'oxygène nécessaire à la combustion complète des gaz du foyer s'échappant par les orifices 14. On peut donc, par la manœuvre convenable de la poignée 22, régler à volonté la combustion.

Le *four Leifert-Bosshardt* est un four à creuset chauffé au coke avec air soufflé. Ses dispositions sont tenues secrètes, bien qu'il commence à se répandre, surtout pour les moulages d'acier. Nous avons pu voir fonctionner ce four à plusieurs reprises et, d'après ce que nous avons vu et les renseignements que nous avons recueillis, nous pouvons dire qu'il assure, avec une certaine économie de combustible et de creusets, la production d'une température assez élevée pour produire la fusion de l'acier extra-doux en peu de temps.

Le procédé ou plutôt le produit obtenu dans ce four a été lancé en Allemagne sous le nom de *fonte réformée ;* comme un tel nom aurait frappé désagréablement nombre de clients français, on

l'a nommé en France : fer-acier. M. Irresberger, dans le *Stahl und Eisen* du 15 février 1904, donne les renseignements suivants :

Avec une durée du creuset de cinq fusions d'acier en moyenne et une consommation de coke de 175 kilogrammes, ce four peut faire en toute sécurité dans une journée de dix heures trois fusions d'acier de 100 kilogrammes chacune. Un fondeur et son aide peuvent facilement servir jusqu'à trois fours, tout en effectuant en même temps les travaux accessoires. Mais ce système ne saurait être préconisé que pour les petits moulages.

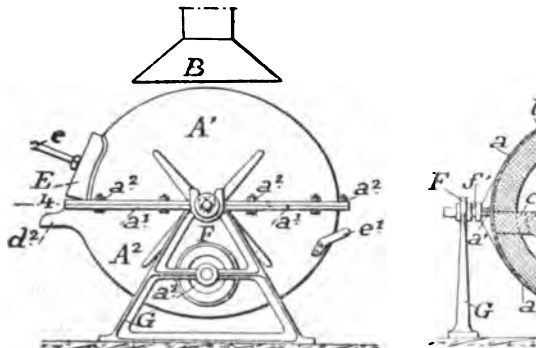


Fig. 11. — Four Paxson-Brown, vue extérieure.

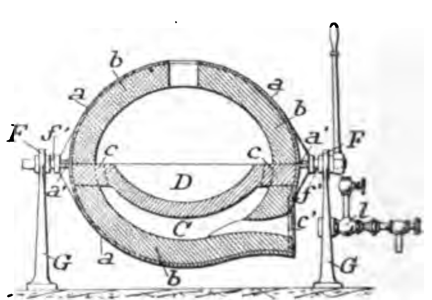


Fig. 12. — Four Paxson-Brown, coupe.

Comme autres fours à creusets spéciaux, il faut citer le four de Paxson-Brown, qui présente des avantages importants. Le combustible est de l'huile brute de pétrole. Les figures 11 et 12 donnent, la première, la vue extérieure ; la seconde, la coupe du four. Il se compose, en somme, de deux parties A_1 et A_2 qui sont rapportées et maintenues par des cornières et boulons *a* (*fig.* 11). Un bâti G soutient l'ensemble, qui peut tourner autour d'un tourillon F.

Le creuset se trouve en D, tandis que le brûleur *l* envoie sa flamme en C. Les métaux sont donc entièrement à l'abri des produits de la combustion. B est une cheminée pour entraîner les produits volatils.

Dans ces mêmes catégories de fours rentre le four Steele (*fig.* 13 et 14). Mais ici le creuset du four 6 a la forme traditionnelle. Il est

supporté par un faux moufle 7, 9, 4 dans lequel brûle le combustible qui, ici encore, est de l'huile de pétrole. Un engrenage 36 et une vis sans fin 37 permettent d'incliner le fond et d'opérer

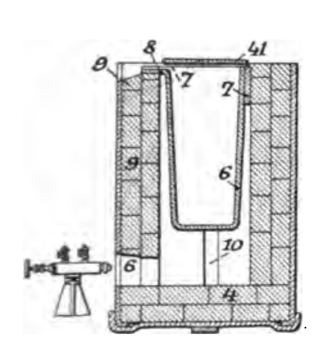


Fig. 13. — Four Steele, coupe.

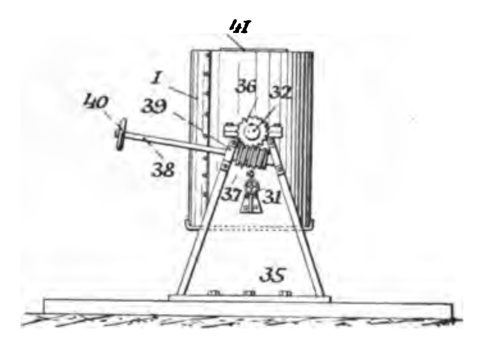


Fig. 14. — Four Steele, vue extérieure.

la coulée. Ce four est utilisé, d'après *The Metal Industry*, dans l'une des plus grandes fonderies de laiton de Baltimore.

Les *fours à creusets chauffés au gaz* présentent de grands avantages au point de vue de la température élevée que l'on peut obtenir (fusion de l'acier), de la production (ils renferment généralement 18 à 24 creusets sur deux rangs) et du coût du combustible. On y a appliqué, bien entendu, le principe connu des générateurs Siemens, qui sont constitués, comme l'on sait, par deux groupes de deux chambres parallélipipédiques garnies de briques empilées à claire-voie (*fig.* 15) : l'air venant de l'extérieur et le gaz venant du gazogène arrivent chacun dans une des deux chambres constituant un groupe ; ils pénètrent dans le four, en se mélangeant dans la chambre de chauffe et, la température du four étant suffisamment élevée, entrent en combustion.

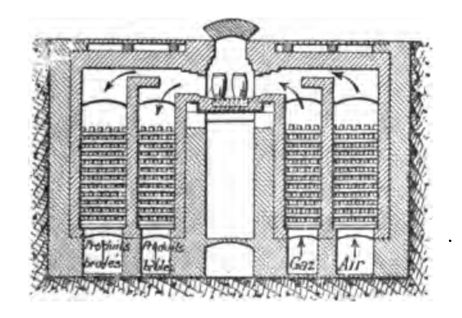


Fig. 15. — Four à creusets chauffés au gaz, coupe.

Les gaz brûlés gagnent la cheminée en traversant le second groupe de chambres; là, ils abandonnent leur chaleur, et l'on conçoit qu'après un certain temps les briques deviennent très chaudes. Au moyen de valves spéciales, on vient alors à intervertir le rôle des groupes de chambres : celui qui vient d'être chauffé par le passage des gaz brûlés est utilisé pour l'entrée de l'air et du gaz, tandis que l'autre groupe de chambres reçoit les produits de la combustion et recommence à s'échauffer.

Les fours à creusets chauffés au gaz ne sont utilisés que pour la préparation d'alliages fondant à haute température, tout particulièrement des aciers.

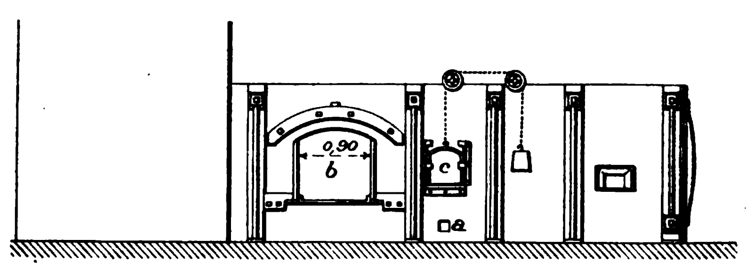


Fig. 16. — Four à réverbère, vue extérieure.

Les *fours à réverbère*[1] ne peuvent être employés que pour une forte production. Ils se composent essentiellement de quatre parties (*fig.* 16, 17 et 18) :

1° La sole, qui est de forme elliptique ou rectangulaire. Elle est ordinairement faite en briques réfractaires, parfois en sable damé ;

2° La grille qui est séparée de la sole par l'autel, ou rebord en matériaux réfractaires. Rarement le four à réverbère est chauffé par des gazogènes ;

3° La voûte, dont la forme générale est la suivante : arrondie au-dessus de la grille, en pente plus ou moins douce au-dessus de la sole. — Parfois cependant elle comporte (*fig.* 17) une double pente pour mieux chauffer un endroit déterminé, qui est ici le point bas de la sole ;

1. Les figures 16 à 18 représentent un four un peu spécial utilisé pour la fonte.

4° La cheminée qui conduit les gaz de la combustion hors du four et qui prend à l'extrémité de la voûte.

Le trou de travail se trouve généralement suivant le grand axe du four, au-dessous de la cheminée et, par conséquent, au

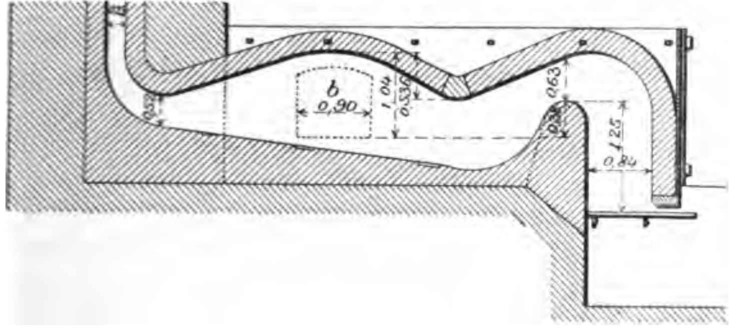


Fig. 17. — Four à réverbère, coupe.

côté opposé à la grille. Parfois il est sur le côté (en *b* et *c*, *fig*. 16).

Le trou de coulée est situé souvent au-dessous du trou de travail ou parfois sur l'un des côtés du four (en *a*, *fig*. 16).

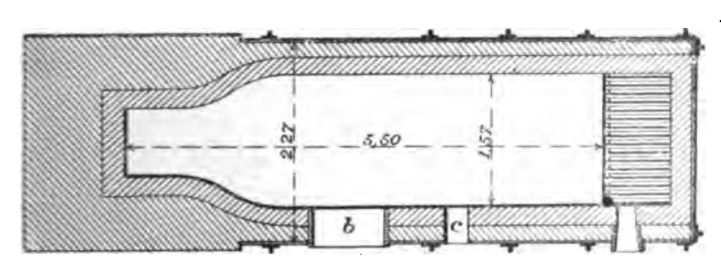


Fig. 18. — Four à réverbère, plan.

La sole a naturellement une pente telle que le métal puisse s'écouler par le trou de coulée.

D'ailleurs, il faut bien noter que la forme du four à réverbère varie beaucoup avec l'usage auquel il est destiné.

On a fait au four à réverbère l'application de gazogènes et des récupérateurs Siemens dans le four Martin.

Le *cubilot* est un four à cuve dans lequel la combustion du coke est alimentée par un courant d'air sous pression ; il faut

toutefois noter que, dans certains cubilots (types Noodward, Herbetz, etc.), on fait arriver de la vapeur d'eau sous pression qui aspire le vent de l'extérieur.

Les cubilots ont généralement la forme d'un cylindre ; parfois ils sont légèrement coniques, la grande base du cône formant, bien entendu, la base même de l'appareil. Souvent on lui donne un profil se rapprochant de celui du haut-fourneau, afin, comme l'a fait remarquer Ledebur, que l'air pénètre plus facilement jusqu'au centre ou que les parties, qui s'usent le plus, aient une surépaisseur.

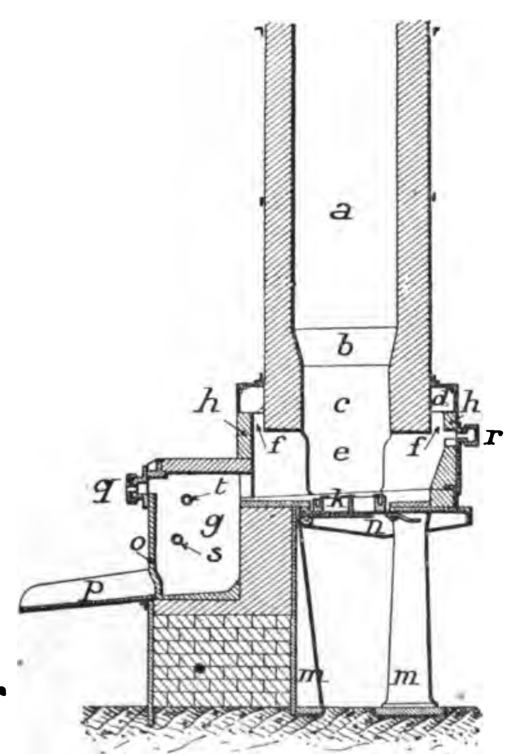


Fig. 19. — Cubilot Krigar.

Il faut que la hauteur soit suffisamment grande pour que les gaz ne sortent pas chauds au gueulard et ne soit pas trop élevée pour que les produits de la combustion ne rencontrent pas une résistance trop grande.

Les tuyères qui amènent l'air comprimé sont réparties d'une façon très variable avec le système de cubilot ; parfois elles sont placées sur une même section horizontale du four ; quelquefois elles se trouvent sur une hélice à pas allongé ; dans certains modèles, on les rencontre sur des circonférences distantes d'environ 1 mètre (cubilot Ireland). Dans la figure 19 la boîte à vent est en *d* ; ici il n'y pas de tuyère, l'air pénètre par de larges ouvertures *f* dans le cubilot.

Le creuset commence au-dessous des tuyères en *e*. Le cubilot comporte souvent un avant-creuset *g*, dans lequel coule la fonte au fur et à mesure de sa production ; *q* est un regard,

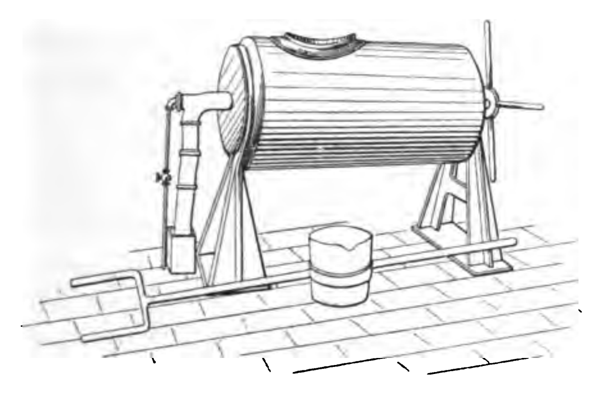


Fig. 20. — Four Charlier, vue extérieure.

t et *s* constituent des ouvertures pour l'écoulement des scories ; *p* est le chenal de coulée.

La maçonnerie du cubilot est enveloppée dans de la tôle. On a rarement cherché à refroidir cette enveloppe.

L'air amené dans le cubilot est froid ; la pression est généralement obtenue au moyen de ventilateurs à ailettes ou du système Root.

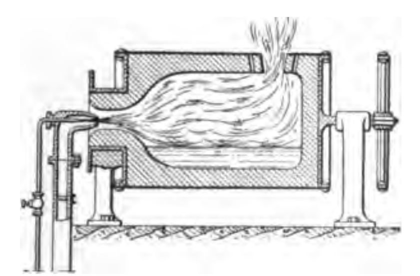


Fig. 21. — Four Charlier, coupe.

Enfin, il nous faut signaler une modification importante, qui est celle du clapet de la sole. On ménage au-dessous de la sole, dans les cubilots qui sont munis d'avant-creuset, une ouverture d'un diamètre sensiblement égal à celui de la cuve. Pendant l'opération un clapet *k* ferme cette ouverture percée dans la plaque *n* qui est soutenue par les colonnes *m*. Lorsque la fusion est achevée, on fait glisser le verrou qui retient le clapet et tout le contenu du cubilot tombe sur le sol de l'atelier.

Comme fours à fondre les alliages et ne comprenant pas de creusets, nous devons encore citer quelques types intéressants.

Le four Charlier (*fig.* 20 et 21), déjà très répandu en Amérique et qui commence à être employé en France, en Belgique, etc., est extrêmement simple. Il utilise l'huile comme combustible. Il est formé d'un assez long cylindre, dont l'axe est horizontal et qui est monté sur tourillon. Le brûleur à huile est à l'extrémité. Les figures 20 et 21 en donnent la coupe et la vue extérieure.

Un four portant le nom d'Orbison se rapproche beaucoup du précédent; mais il est en continuel mouvement, ce qui,

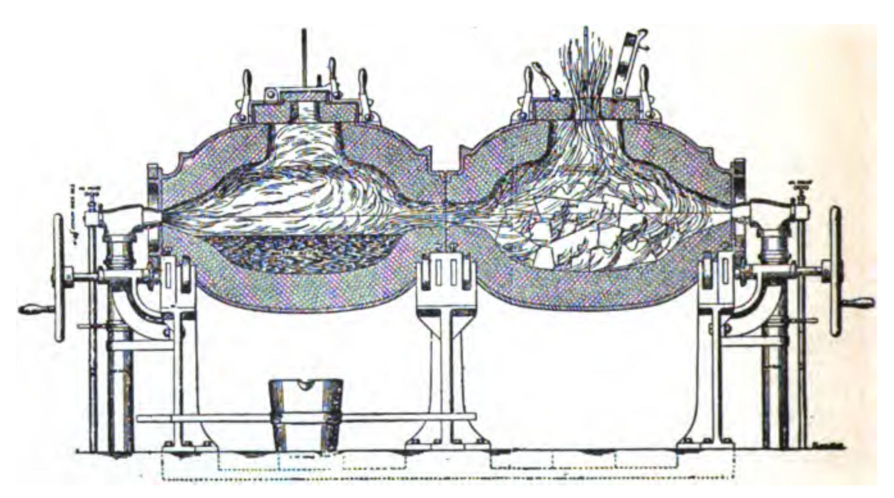


Fig. 22. — Four Rockwell.

d'après l'auteur, permet d'obtenir un métal plus homogène.

Un autre four qui est très employé en Amérique est le four *Rockwell*, dont la coupe se trouve figure 22.

Il est, en somme, composé de deux fours qui communiquent ensemble ainsi que l'indique la figure 22. Tandis que la matière à fondre se chauffe dans l'un des fours en utilisant les flammes perdues provenant de l'autre four, la matière fond dans ce dernier dont le chalumeau air-huile de pétrole fonctionne. Pendant ce temps les flammes s'échappent par la porte du four qui utilise les flammes perdues.

Le métal étant fondu, on le coule et on le remplace par les

produits à fondre ; à ce moment on allume le chalumeau du second four et le rôle se trouve inversé.

Bien qu'utilisant les chaleurs perdues, cet appareil est moins simple et paraît moins pratique que le four Charlier, le garnissage du four est plus complexe et doit être d'un prix assez élevé.

Enfin le four Schwarz a une forme spéciale donnée dans la figure 23 et qui se rapproche de celle d'un Bessemer ; on voit également que le brûleur n'est pas suivant l'axe de mouvement du four.

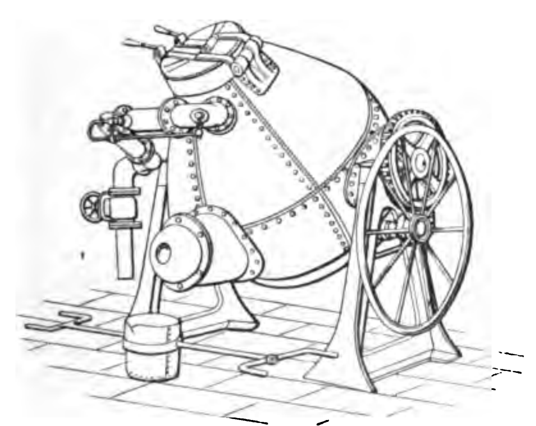


Fig. 23. — Four Schwarz.

Les fours électriques se divisent en deux classes :

1° *Fours électriques à électrodes ;*

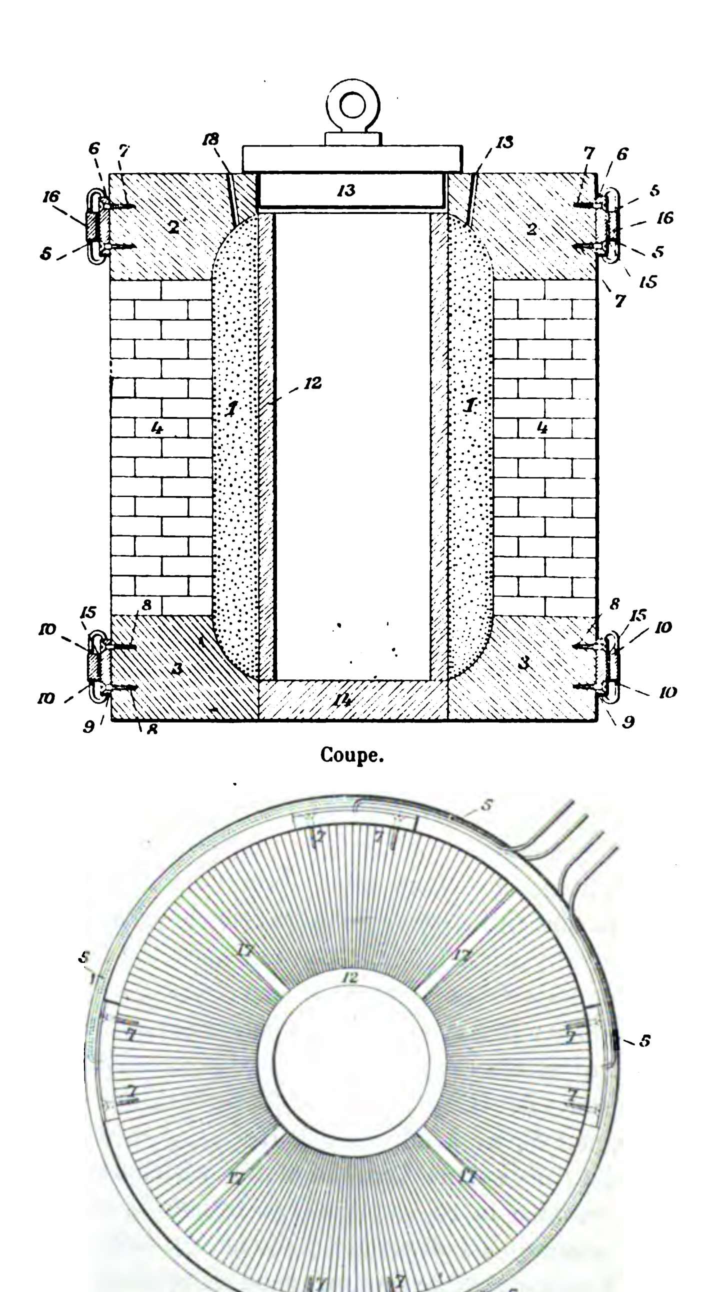
2° *Fours électriques sans électrodes.*

On adopte souvent la division en fours électriques à arc et en fours électriques à résistance. Mais nous verrons que dans de nombreux cas les fours électriques à arc sont utilisés comme fours électriques à résistance.

Étant donnée l'introduction récente de ces appareils dans l'industrie, nous insisterons sur leur description ; nous reviendrons à plusieurs reprises sur leurs emplois au cours de ce livre.

Parmi les fours électriques sans électrodes, nous citerons tout d'abord les fours de la Société électrométallurgique d'Albertville, dus à son directeur M. P. Girod.

Le principe réside dans l'emploi d'une résistance en graphite, qui entoure le récipient où se trouve la matière à traiter. Le courant est distribué, suivant les dimensions du four, à un nombre plus ou moins grand de sections, les sections étant isolées dans le sens de la longueur par de petites cloisons en terre réfractaire ; le tube à chauffer est placé au milieu de la masse résistante.



Coupe.

Plan.

Fig. 24 et 25. — Four Girod.

Les figures 24 et 25 représentent l'un de ces fours : un tube réfractaire 12 est chauffé extérieurement par une masse résistante 1. Les pièces 2 représentent l'un des pôles, les pièces 3 l'autre pôle ; un mur de briques 4 sépare les deux pôles et entoure la masse chauffante, de façon à éviter les déperditions de chaleur. Les fils conducteurs sont représentés en 5, les plaques supérieures de charge qui sont en bronze sont figurées en 6; les vis 7 et 8 serrent les plaques de cuivre contre le four.

En 9 se trouvent les plaques de bronze inférieures; en 10, les câbles d'amenée du courant inférieur.

Tout le four est fermé par un couvercle en terre réfractaire 13, et le fond du four est constitué par une plaque en terre réfractaire 14.

Enfin 15 sont des plaques d'amiante isolant les cercles de fer qui servent, d'une part, à assurer le contact sur les pôles et, d'autre part, à cercler le four ; et 17 représentent des cloisons en terre réfractaire qui séparent le four en quatre sections de chauffe différentes.

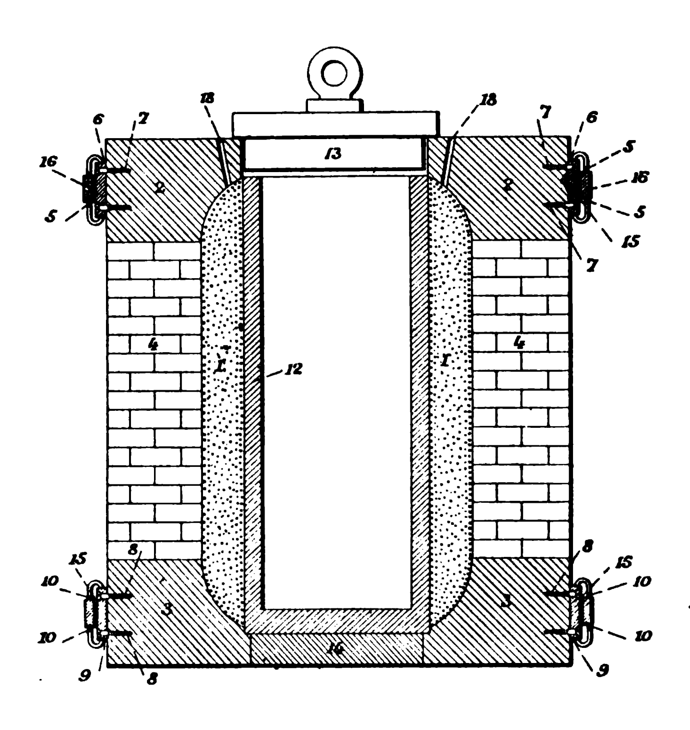
Cette disposition permet, le voltage normal de chaque section de chauffe étant de 50 volts, d'utiliser les fours pour un courant continu à 200 volts en branchant en séries les sections. Suivant la dimension et le voltage employés, les fours peuvent être divisés en un nombre de sections allant jusqu'à vingt; ce nombre de sections est atteint dans les fours employés pour cuire les électrodes.

On peut aussi utiliser le courant triphasé en sectionnant les fours en un nombre de parties multiples de trois.

Les figures 28 et 29 représentent le même four plus spécialement destiné à des alliages fondant à assez basse température, tels que le bronze.

Le four est porté sur deux tourillons qui permettent de le faire basculer pour la coulée. D'après les expériences faites, un tel creuset peut durer cent opérations.

D'ailleurs, la même disposition peut, bien entendu, être



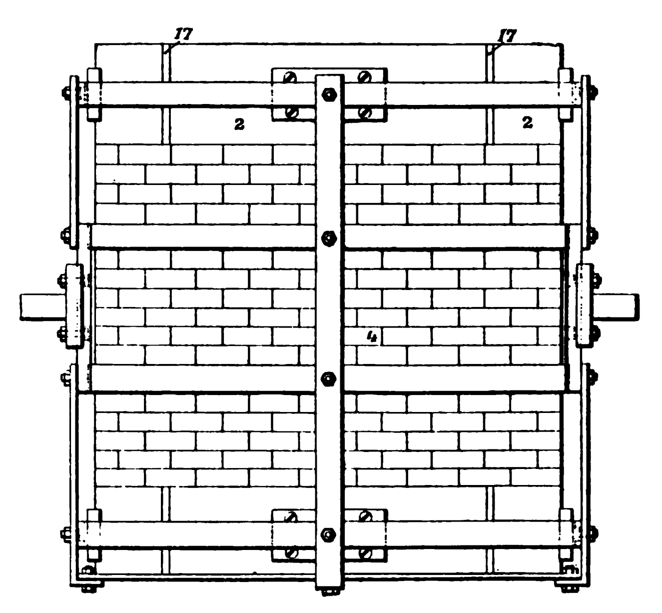
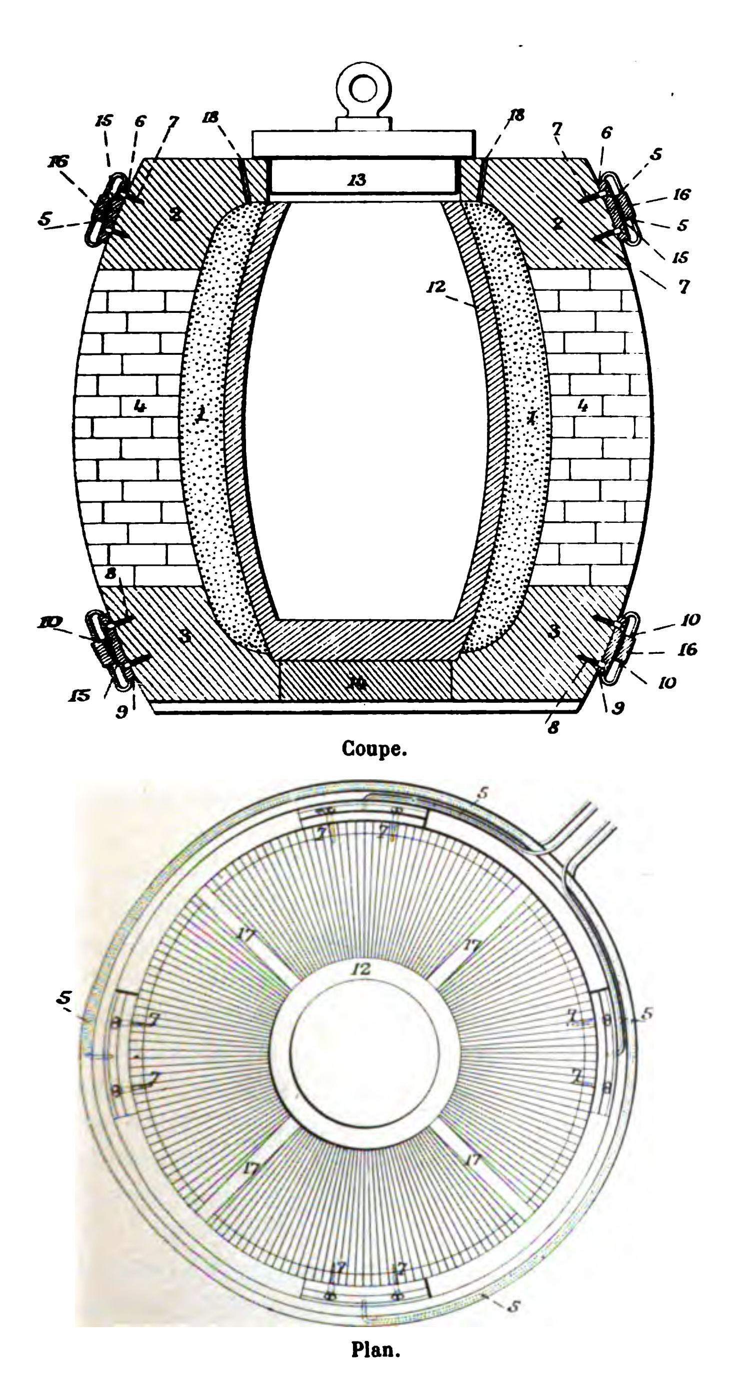


Fig. 26 et 27. — Autre four Girod.



Coupe.

Plan.

Fig. 28 et 29. — Four Girod pour bronzes et laitons.

adoptée pour les aciers; la plus généralement utilisée est celle des figures 26 et 27.

On peut alors faire dix coulées sans arrêter.

La Société électrométallurgique d'Albertville donne, comme production d'acier de son four par kilowatt-vingt-quatre heures, 4 à 6 kilogrammes, suivant l'acier que l'on fabrique et surtout suivant la teneur en carbone des fers ou riblons employés. La production de 4 kilowatts-vingt-quatre heures a trait aux aciers au tungstène à très haute teneur en ce métal et à teneur en carbone très faible (0,30-0,35 0/0). On est alors obligé de partir de fer pur.

Les usines d'Ugine, qui appartiennent à la Société, donnent comme prix de revient du kilowatt-an, 40 francs, prix dans lequel sont compris les intérêts du capital, l'amortissement du matériel et l'entretien des machines. On peut alors établir le prix de fusion de 100 kilogrammes d'acier en admettant que l'entretien des fours et la main-d'œuvre restent les mêmes que dans la fusion de l'acier au creuset; la différence serait plutôt en faveur du four électrique.

La dépense, non compris l'entretien du creuset, est d'environ 2 fr. 70 aux 100 kilogrammes[1].

Pour diminuer les pertes de chaleur par rayonnement, on peut laisser des espaces vides dans le revêtement en briques.

On peut utiliser des fours analogues pour le chauffage de gros lingots, notamment de grosses électrodes.

Un tel four est constitué par une cornue à gaz; cette cornue porte cinq cloisons, qui divisent la masse résistante en sept sections différentes. On obtient ainsi une régularité de chauffe remarquable, et on peut utiliser un courant continu d'un voltage allant jusqu'à 500 volts, en branchant en série les sept sections sur le courant de l'usine, par exemple; dans ce four, chaque section peut avoir 70 volts.

Fours à induction. — Le premier four à induction est dû à Ziani de Ferranti (brevet du 15 janvier 1885; voir *Revue de*

1. Il faut bien noter que les fours Girod ne sont que de véritables fours à creusets; ils n'en diffèrent que par le mode de chauffage.

Métallurgie, janvier 1905, observations de M. Saladin à la suite de la conférence de M. Combes à la Société d'Encouragement). Ce four, qui comprend une armature de transformateur à trois piliers, supporte deux enroulements. L'un primaire reçoit le courant ; l'autre est formé par une auge en matière isolante et réfractaire qui reçoit le métal fondu. Toute l'énergie induite se transforme en chaleur dans cette auge, qui n'a qu'une spire unique en court-circuit.

Four Kjellin. — Cet appareil a été appliqué aux usines de Gysinge (Suède). Le four Kjellin comprend une rigole circulaire AA (*fig.* 30 et 31), qui est fermée par un couvercle B.

Un noyau carré C, formé de tôles minces d'acier doux, se trouve au centre ; il est entouré d'une bobine de fil de cuivre D bien isolée et reliée aux pôles d'une machine à courant alternatif.

Le noyau C se prolonge hors du four en rectangle et entre, en somme, dans le four comme le maillon d'une chaîne dans l'autre.

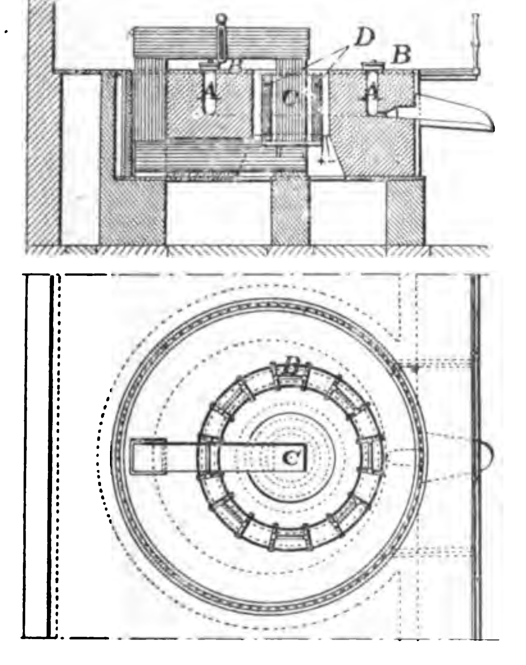


Fig. 30 et 31. — Four Kjellin.

Un tel four est en quelque sorte un transformateur dont le circuit secondaire est constitué par l'anneau de métal fondu qui se trouve dans la rigole AA. Le métal est soumis ainsi à un courant alternatif.

On charge dans ce four des morceaux de fonte et de riblons en quantités convenables.

En 1900, on a utilisé à Gysinge un four de 180 kilogrammes de capacité produisant, avec 58 kilowatts à la machine, 600 à 700 kilogrammes d'acier par vingt-quatre heures. Une charge de 100 kilogrammes demandait trois à quatre heures.

Four du Creusot. — Le four de MM. Schneider et C[ie] a une disposition spéciale permettant de faire circuler le métal en fusion. Le principe, tel qu'il a été donné par M. Saladin, est analogue à celui des chaudières à circulation d'eau dans des tubes. Un grand réservoir plein d'eau et non chauffé peut être entretenu à haute température par un tube de circulation chauffé. La différence de densité entre l'eau froide et l'eau chaude amène au réservoir par une circulation active les calories fournies au tube. Si on suppose la chaudière remplacée par une enveloppe réfractaire, et l'eau remplacée par de l'acier fondu, il suffit de chauffer l'acier contenu dans le tube au moyen de l'artifice d'inducteur de Ferranti pour entretenir et augmenter même la température de l'acier dans le réservoir. La vitesse du métal atteint ainsi plusieurs mètres par seconde.

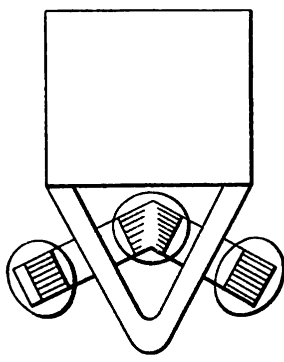


FIG. 32. — Four Schneider.

Le modèle actuel du four de MM. Schneider et C[ie] (*fig.* 32) comprend un grand réservoir à deux tubes rectilignes passant entre les branches d'un transformateur à trois piliers portant l'enroulement primaire. On peut laisser un des tubes horizontal et incliner légèrement l'autre.

Fours Froges-Héroult. — Les fours utilisés aux usines de la Praz (Savoie), par la Société électrométallurgique française, sont des fours à arc [1].

1. Conférence de M. Charles Combes faite à la Société d'Encouragement pour l'industrie nationale, le 9 décembre 1904, et publiée dans la *Revue de Métallurgie* de janvier 1905.

Parmi les modèles qui ont été essayés industriellement, il

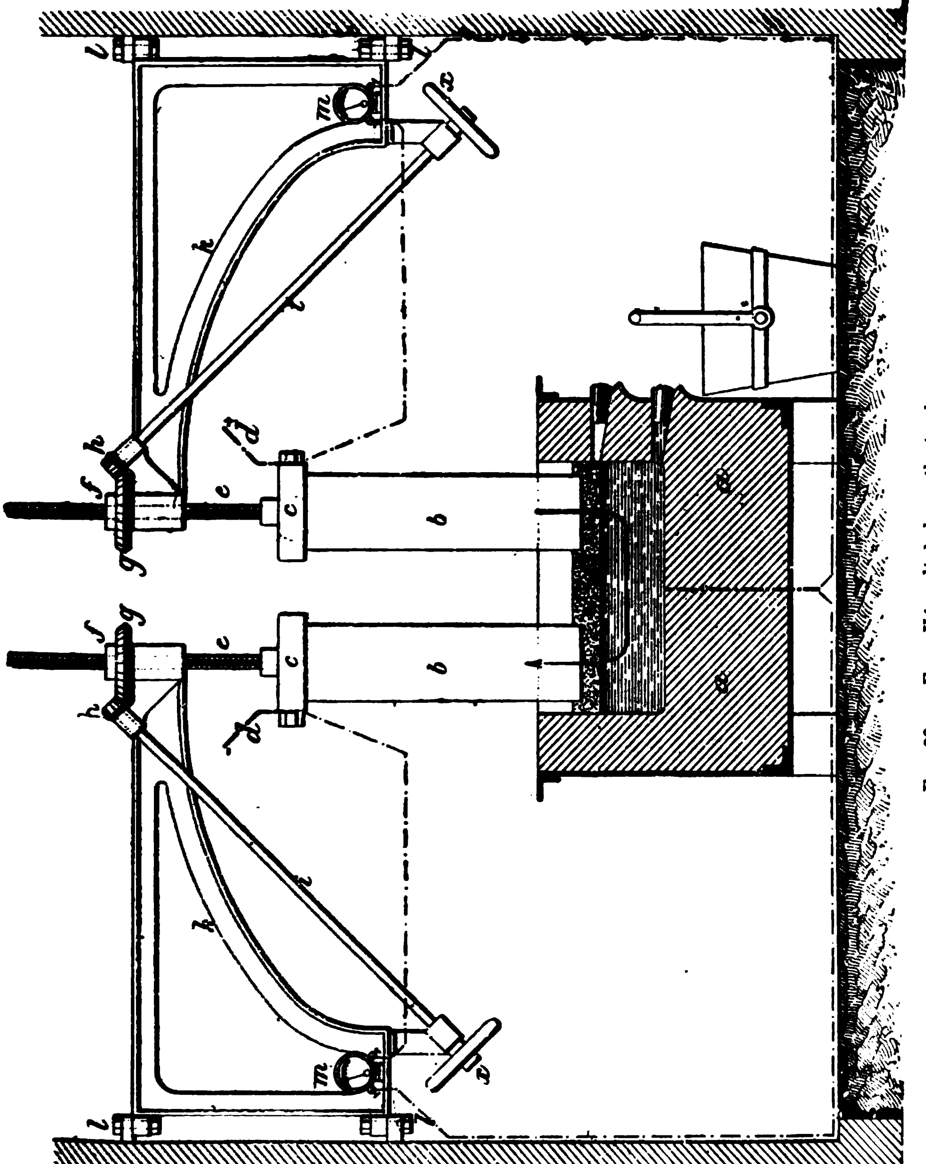


Fig. 33. — Four Héroult à deux électrodes.

faut distinguer les fours utilisés pour la fabrication de la fonte et ceux employés pour l'obtention de l'acier.

La fabrication de la fonte avec le four de Froges ne présente aucune difficulté particulière. Le four (*fig.* 33) se compose d'un creuset *a* où agissent les électrodes *b* qui sont mobiles et réglables au moyen de tiges, engrenages et volants *x*, *i*, *h*, *f*, *g*, *e*; le courant est amené en *m*, *d*; il entre par une électrode et sort par l'autre.

Le creuset est surmonté d'une rehausse (*fig.* 34). Il comprend un appareil spécial créé par M. Héroult qui l'a appelé *économiseur*. Le minerai *seul* est amené par une cheminée inclinée ou verticale, dans laquelle doit passer l'oxyde de carbone qui se dégage du creuset. De l'air soufflé à l'entrée de la cheminée

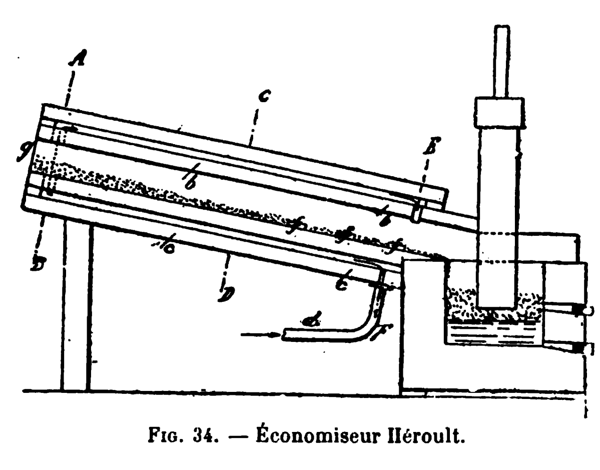


Fig. 34. — Économiseur Héroult.

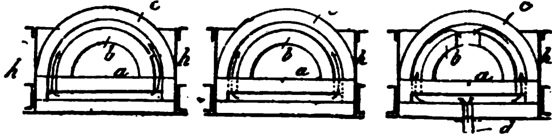


Fig. 35. — Coupes de l'économiseur suivant AB, CD et EF.

en *d* fait brûler l'oxyde de carbone; sous l'influence de la température, le minerai fond et vient tomber dans le creuset où le charbon est chargé directement.

Un autre modèle de four essayé dans le même but a été dénommé *four à électrode coulante* (*fig.* 36 et 37). Le creuset C est surmonté d'une cuve à garnissage réfractaire. Cette cuve H renferme une colonne de coke que parcourt le courant

électrique qui arrive en J et sort en I. A ce coke vient se mélanger le minerai provenant de l'économiseur A.

Le combustible forme donc lui-même une électrode qui s'écoule pendant que la réaction se produit. Le contact inférieur par lequel a lieu le passage du courant est formé par la sole du four B qui est en charbon, et le contact supérieur par

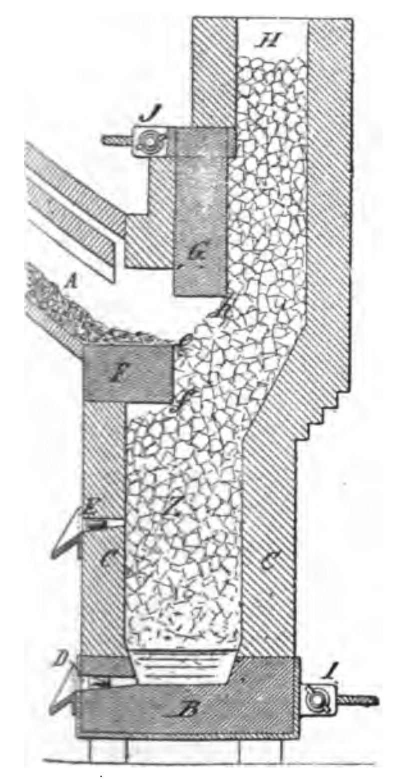



Fig. 36. — Four Héroult à électrode coulante.

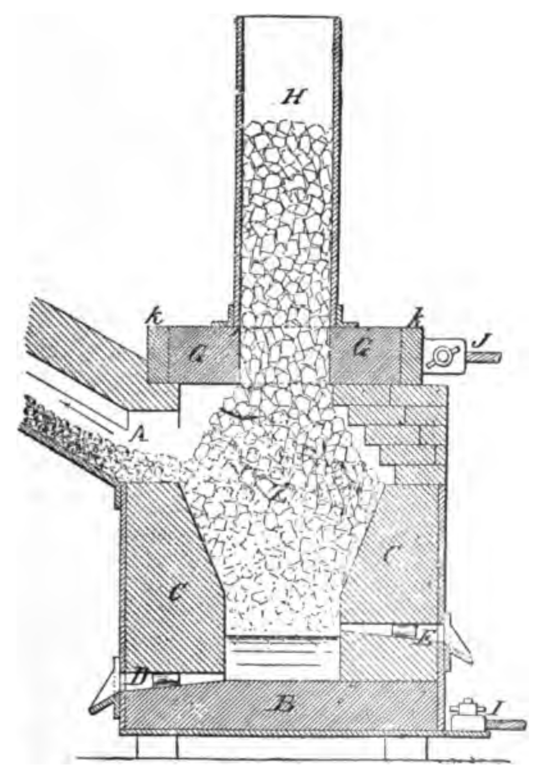


Fig. 37. — Autre four Héroult à électrode coulante.

des blocs de charbon placés au-dessus de la cuve en F et G.

Le défaut reconnu à ces appareils réside dans l'usure rapide des parois de l'économiseur par l'oxyde de fer fondu.

Les fours destinés à la fabrication de l'acier sont munis de deux électrodes en série, de telle sorte que le courant va de l'une des électrodes à la masse métallique, qui se trouve dans le creuset du four, par un arc qui jaillit à travers le laitier et

sort par un second arc qui passe du bain métallique à la deuxième électrode.

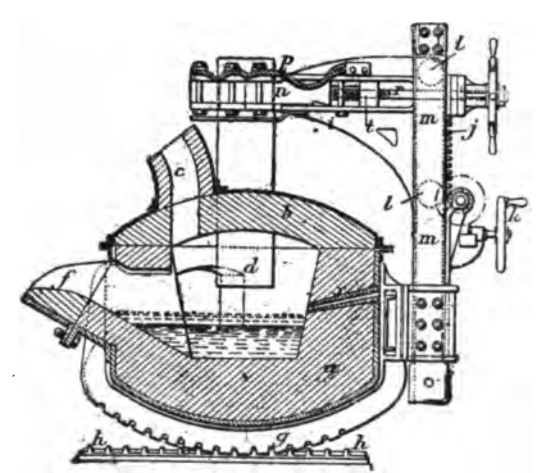


Fig. 38. — Four oscillant Héroult.

Le four est muni de deux trous de coulée et d'un couvercle qui permet de concentrer la chaleur.

Les derniers modèles utilisés par les usines de la Praz sont des fours basculants qui peuvent être manœuvrés par des appareils hydrauliques ou électriques (*fig.* 38 et 39) ; on peut ainsi évacuer beaucoup plus facilement les laitiers. Ils comportent trois portes, l'une placée sur le devant du four, qui est utilisée pour la coulée ; les deux autres, sur les côtés, ont pour but de permettre le chargement et le décrassage des fours (*fig.* 40, 41 et 42).

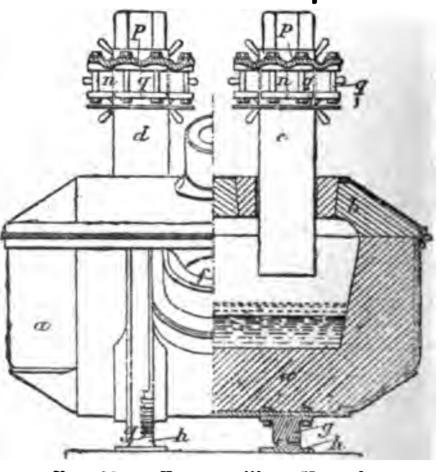


Fig. 39. — Four oscillant Héroult.

Four Stassano. — Le procédé Stassano est le premier procédé qui ait permis de traiter des masses importantes de minerais au four électrique. Le premier modèle n'était qu'un haut-fourneau possédant au-dessus du creuset deux électrodes horizontales, que l'on pouvait faire mouvoir soit à la main, soit hydrauliquement.

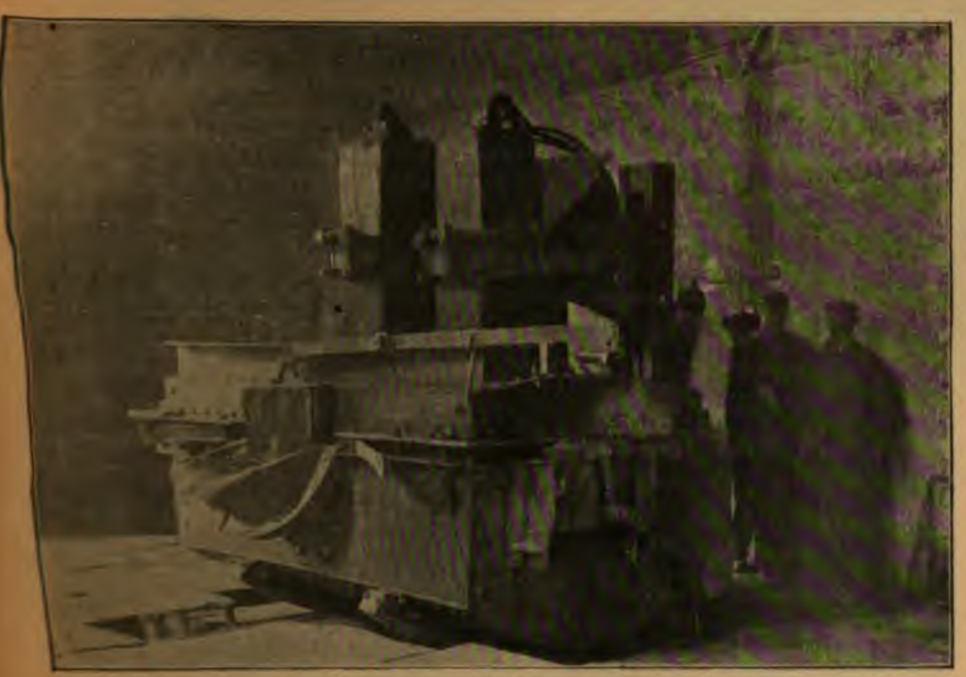


Fig. 40. — Four oscillant Héroult, vue au repos.

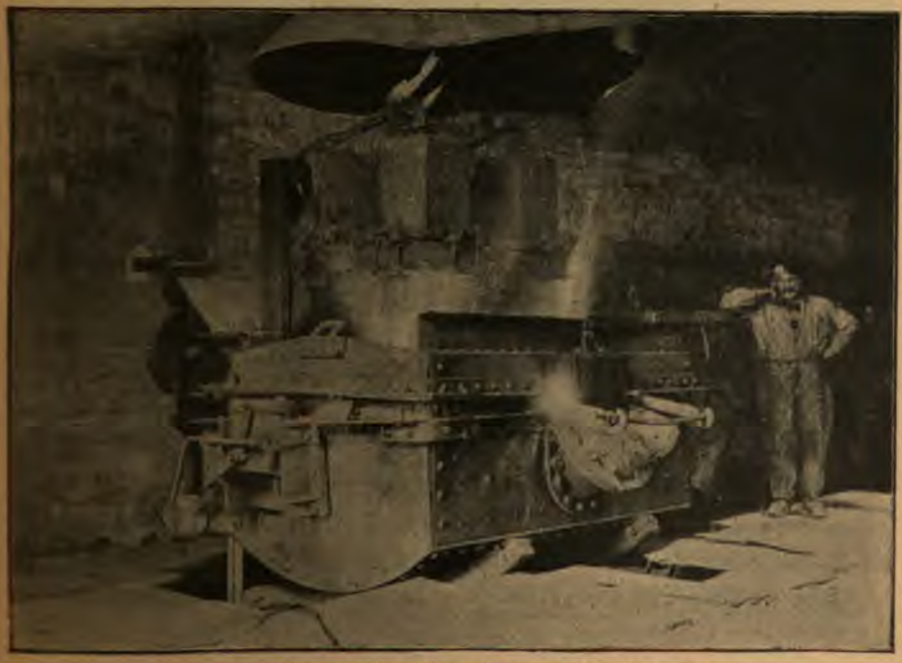


Fig. 41. — Four oscillant Héroult, vue en fonctionnement.

Stassano a créé ultérieurement deux autres modèles : l'un est un four à sole avec trois paires d'électrodes dont le



Fig. 42. — Four oscillant Héroult, vue au moment de la coulée.

réglage se fait à la main ; l'autre est un four rotatif sur la marche duquel on ne possède pas de renseignements précis.

Précautions à prendre pendant la fusion des alliages. — Un très grand nombre de métaux s'oxydent aisément pendant la fusion. Il faut éviter cette oxydation, qui est des plus nvisibles, non seulement parce qu'il y a perte de matières, mais encore parce qu'il y a production d'impuretés qui peuvent rester incorporées dans l'alliage et y amener de graves défauts.

Pour empêcher l'oxydation, on a soin de disposer à la surface du bain des morceaux de charbon de bois. Parfois même

on emploie des sels qui, fondant aisément, forment à la surface une couche protectrice contre l'action de l'air : le borax ou borate de soude est notamment très utilisé.

II. — COULÉE DES ALLIAGES

De la composition de l'alliage au moment de la coulée. — Un problème des plus importants réside dans la connaissance de la composition de l'alliage au moment de la coulée. Il y a, en effet, pendant la fusion, des pertes qui peuvent provenir des diverses causes suivantes :

α) La volatilisation des matières premières ;

β) Leur oxydation ;

γ) Leur entraînement par le tirage de la cheminée, cause des plus importantes dans le cas de l'utilisation des vieilles matières.

L'alliage ne renferme donc généralement pas au moment de la coulée le mélange utilisé.

La sidérurgie, qui emploie pour la fabrication courante des procédés d'affinage, opère avec grands soins à ce point de vue ; elle prélève des échantillons dont elle examine avec soin la façon de se comporter au pliage, la cassure, etc. ; parfois même elle fait un dosage rapide de certains éléments, notamment du phosphore.

Une autre fabrication dont nous parlons plus loin en détail, celle des laitons spéciaux, procède souvent de même dans la coulée des pièces importantes, telles que les hélices ; des échantillons sont analysés rapidement avant la coulée. Mais généralement on tient compte des pertes par comparaison avec des opérations-types.

De la température de coulée et de son influence sur les propriétés des alliages. — La température de coulée a une

influence considérable sur les propriétés des alliages métalliques.

De nombreuses études ont été faites sur ce sujet. Nous détacherons de la plus récente quelques conclusions intéressantes. Elle est due à M. P. Longmuir et a été présentée à la réunion de mai 1903 de l' « Iron and Steel Institute » et résumée dans la *Revue de Métallurgie* de janvier 1904.

La pratique courante de la fonderie apprend que les propriétés mécaniques d'un moulage dépendent de la température initiale à laquelle le métal est introduit dans le moule. Dans le cas de l'acier, M. Hadfield a montré que la structure cristalline particulière des aciers fondus peut dans tous les cas disparaître par un recuit approprié, mais que, néanmoins, le produit n'a pas toujours une qualité convenable. D'autre part, l'acier coulé trop froid dans les moules, indépendamment des irrégularités de la surface, se comporte souvent d'une façon peu satisfaisante au laminoir ou au marteau-pilon.

Le professeur Arnold cite deux échantillons d'acier fondu ayant exactement la même composition et ne différant que par la température de coulée, dont l'un a donné des résultats mécaniques excellents, tandis que l'autre, même après un recuit convenable, a donné des résultats beaucoup plus faibles.

Enfin l'usage d'ajouter des riblons froids au métal trop chaud est encore en relation avec la question de température de coulée.

D'après les recherches de M. Campbell, l'addition de 45 kilogrammes de riblons dans une masse d'acier fondu de 7.000 kilogrammes abaisse la température de 20°.

Cette influence est la même pour les métaux autres que l'acier : par exemple, l'aluminium coulé à la température convenable du rouge sombre possède des propriétés sensiblement distinctes de celles qu'il possède lorsqu'il a été coulé au blanc. De même, pour les antifrictions, les coussinets, coulés trop chaud ou trop froid, tendent à chauffer, tandis que ceux qui ont été coulés normalement font un service beaucoup plus prolongé.

Voici quelques résultats d'expériences capables de mettre en évidence les essais rappelés plus haut.

Des barres d'acier coulées d'une même poche et, par suite, avec un métal de même composition, mais après des intervalles de temps plus ou moins longs, de façon à laisser la température baisser, ont donné aux essais de flexion des résistances variant dans le rapport de 1 à 1,5. Une trentaine d'expériences, faites sur un alliage spécial pour lequel toutes les conditions autres que la température de coulée étaient identiques, ont donné les résultats suivants.

	Minimum	Maximum
Ténacité en kilogramme par millimètre carré..	19,70	41,30
Allongement 0/0 sur 20 centimètres...........	5	51,6

Des barreaux d'essai découpés dans un moulage qui avait été rebuté donnèrent comme moyenne de trois essais :

Ténacité...........................	10kg,25 par millimètre carré
Allongement 0/0 sur 6 centimètres..	3,75

Cette pièce fut refondue et coulée de nouveau à une température convenable, et les résultats de l'essai furent :

Ténacité...........................	24kg,27 par millimètre carré
Allongement 0/0 sur 6 centimètres..	10

Le métal à canon, bronze à 10 0/0 d'étain, est également très sensible à la température de coulée ; son grain croît rapidement avec cette température, comme on s'en rend compte aisément par les observations métallographiques.

Les expériences dont il est ici rendu compte ont porté principalement sur le laiton et accessoirement sur le bronze, le métal Muntz et la fonte malléable.

ALLIAGES	TEMPÉRATURE DE COULÉE	LIMITE ÉLASTIQUE kilogrammes par millimètre carré	TÉNACITÉ kilogrammes par millimètre carré	ALLONGEMENT 0/0 sur 6 centimètres	STRICTION	ANGLES de RUPTURE
Bronze à canon	1.173°	10,20	13,20	5,25	14,3	30°
	1.069°	13,36	23,38	14,5	16,7	40°
	965°	14,15	17,36	5	6,36	40°
Laiton	1.182°	6,98	18,20	37,7	37	
	1.020°	6,25	20,01	43	35	180°
	850°	6,24	11,74	15	15	
Cuivre demi-rouge	1.308°	6,75	10,80	13,2	12,6	
	1.073°	6,71	19,92	26	30,3	105°
	1.058°	6,88	8,82	5,5	6,6	
Métal Muntz	1.038°	13,80	19,62	6	10,6	80°
	973°	15,20	29,78	15	16,1	180°
	943°	15,00	25,68	19,5	14,8	180°
Fonte grise	chaude		19,33			
	bonne temp.		20,64			
	froide		15,91			
Fonte malléable	chaude	27,42	38,29	1,75		
	convenable	25,37	12,55	5,75		
	froide	19,22	37,82	3,50		

Dans le cas du bronze, les conditions usuelles de 25 kilogrammes par millimètre carré et 7 1/2 0/0 d'allongement ont été satisfaites pour le deuxième échantillon coulé à 1.069°; mais le troisième échantillon coulé deux minutes plus tard ne satisfait ni aux conditions de ténacité ni aux conditions d'allongement. C'est pour le cuivre demi-rouge que l'effet de la température de coulée a été le plus accentué.

Les échantillons soumis aux essais mécaniques furent ensuite examinés par les procédés de la métallographie microscopique.

Dans les métaux coulés à basse température, la cristallisation est plus accentuée qu'aux températures élevées et les lignes de jonction des cristaux sont très nettes, préparant en quelque sorte le chemin aux lignes de fractures. Dans les métaux coulés à la température convenable, la cristallisation est surtout caractérisée par son enchevêtrement général et la moindre netteté des lignes de séparation des cristaux. Aux

températures élevées, les cristaux sont très grands, mais la cristallisation reste un peu floue, sans lignes de séparation bien nettes.

Dans le mémoire original, l'auteur donne les compositions de ses alliages. Nous les résumons dans le tableau suivant.

ALLIAGES	COMPOSITION DÉSIRÉE			COMPOSITION TROUVÉE		
	Cu	Zn	Sn	Cu	Zn	Sn
Bronze à canon	88	2	10	87,56	2	10[1]
Laiton	70	30		64,18	35,2	
Cuivre demi-rouge	90	10		85,7	14,3	
Métal Muntz	60	40		50,0	50,0	[2]

Nous dirons, enfin, qu'en faisant varier la température de coulée de 1.100° à 950° pour des laitons au manganèse, nous avons trouvé des allongements variant de 4 à 20 0/0.

Des moules où s'effectue la coulée. — On peut couler l'alliage fondu soit dans des moules métalliques, soit dans des moules en sable, plâtre, argile, etc.

Les moules métalliques peuvent être des lingotières ou des moules véritables, au sortir desquels les objets peuvent être utilisés après simple ébarbage et brossage.

Les lingotières ont la plupart du temps des formes appropriées aux traitements mécaniques que doit subir le métal. C'est ainsi que, lorsque le laiton, l'aluminium, etc., sont destinés à être laminés en planches, on les coule en bandes épaisses,

1. Il doit y avoir à ce sujet une faute d'impression : on a écrit : Cu = 88, Zn = 10, Sn = 2.

2. Nous pensons qu'il y a eu sur cet alliage une erreur d'analyse. Nous verrons plus loin que l'alliage à 50 0/0 de cuivre et 50 0/0 de zinc n'a pas les propriétés trouvées ici.

la section des moules est rectangulaire, quelquefois les angles du rectangle sont arrondis.

En sidérurgie, les lingotières, qui sont en bonne fonte grise, ont généralement la forme d'un tronc de pyramide à section carrée, rectangulaire ou polygonale et ouvert à ses deux extrémités. Cette lingotière vient reposer sur une plaque de fonte épaisse qui clôt le récipient.

On emploie des lingotières à section carrée, surtout pour les petits et moyens lingots; tandis que, pour les gros lingots, on utilise souvent les lingotières hexagonales et octogonales, et que, pour les lingots destinés à la fabrication des tôles ou plaques de blindage, on prend des lingots rectangulaires aux angles arrondis.

Quant aux moules en sable, qui sont usités la plupart du temps en vue d'obtenir des pièces de forme complexe ou, du moins, très approchées des cotes avec lesquelles elles doivent être employées, ils sont obtenus par des moyens spéciaux qui constituent l'art du mouleur. Nous ne saurions entrer ici dans le détail de ces opérations.

Influence de la vitesse de refroidissement. — La vitesse de refroidissement d'un alliage après solidification a une très grande influence sur les propriétés du métal.

Plus le refroidissement est lent, plus le grain du métal est développé, plus les cristallisations sont apparentes. Plus le refroidissement est rapide, plus le grain est fin et serré. Nous verrons des applications très importantes de ce fait. Disons de suite qu'on le met souvent en pratique dans les pièces moulées, en ayant soin de démouler lorsque le métal est encore chaud, cela de façon à obtenir un grain fin par une espèce de trempe à l'air.

Emploi des alliages en deuxième fusion. — On est souvent conduit dans l'industrie à utiliser en seconde fusion différents alliages, soit que l'on n'emploie comme matières premières que des déchets, soit que l'on veuille utiliser des résidus d'opérations précédentes, tels que les masselottes.

Il faut bien noter que généralement, dans la seconde fusion, l'alliage se modific et les changements apportés parfois sont très profonds.

Les alliages renfermant du zinc, du plomb, perdent de ces métaux par évaporation et oxydation; les alliages contenant du phosphore, du manganèse, de l'aluminium voient leurs doses de ces corps diminuer, dans la seconde fusion, par oxydation. On a même indiqué que certains alliages à haute teneur en divers métaux oxydables, notamment le manganèse, ne se refondaient pas ou du moins ne donnaient pas par seconde fusion un produit industriel. Nous croyons que cette opinion est absolument erronée; mais la fusion de ces alliages demande des précautions spéciales, voire même des additions améliorantes.

Des diverses méthodes de coulée. — Si la masse de métal fondu est faible, on la coule directement du creuset au moule. Quelquefois on interpose une espèce d'écumoire entre le creuset et le moule, de façon à éliminer certaines impuretés et à mieux distribuer le métal dans le moule.

Lorsque la masse à couler est importante, on utilise une poche de coulée qui sert d'intermédiaire entre le four et les moules. Ces poches de coulée sont en forte tôle garnie dans l'intérieur d'une couche de briques ou d'argile réfractaire que l'on mélange souvent de paille pour faciliter son adhérence aux parois. Le fond de la poche est incliné vers un trou de coulée, qui est situé sur le côté; une tige, formée d'un morceau de fer garni de terre réfractaire et nommée *quenouille,* permet d'obturer le trou de coulée au moyen d'un bouchon.

Il est bien évident que l'on peut rassembler dans une seule et même poche le produit de plusieurs fours; l'exemple est des plus fréquents en sidérurgie dans la fabrication de l'acier au four Martin. De la poche de coulée le métal doit gagner la lingotière ou le moule.

On verse généralement le métal dans la lingotière par la partie supérieure. C'est ce qu'on appelle le procédé de *coulée*

à la descente. Cependant on utilise parfois une autre méthode dite *coulée en source*.

Elle consiste essentiellement à faire arriver le métal dans le bas de la lingotière, cela au moyen d'un canal spécial en terre réfractaire. Cette méthode a l'avantage de supprimer les gouttes froides dont nous parlons plus loin; mais elle est très coûteuse.

Enfin il est bon de signaler l'emploi restreint, il est vrai, d'une poche de forme spéciale rappelant une saucière : un cloisonnement qui existe partant du bec et allant presque jusqu'au fond du récipient permet de faire couler le métal, tandis que les scories demeurent à la surface.

Des phénomènes que l'on note à la solidification. — Lorsque le métal se solidifie, on remarque souvent deux phénomènes très nets :

La *formation de la poche de retassure;*

Une *liquation*.

Souvent on note un autre phénomène que l'on nomme le *rochage* et qui consiste dans un dégagement gazeux.

Le phénomène de la poche de retassure est dû principalement à ce que, le métal prenant un retrait pendant la solidification, la partie supérieure sert à alimenter le moule. De plus, une partie des gaz dissous s'échappe; enfin les crasses remontent.

Le phénomène de la liquation est dû à des différences existant entre les densités de divers constituants. Nous en citerons un exemple des plus frappants : nous verrons plus loin que dans certains bronzes dits de frottement on incorpore des quantités importantes de plomb; or, ce plomb garde dans l'alliage sa personnalité et il tend à gagner les parties extérieures et basses du lingot.

Défauts des pièces moulées et des lingots. — Les principaux défauts des pièces moulées et des lingots sont :

Les *soufflures* qui proviennent surtout d'une température de

coulée trop basse, d'impuretés, de manque de matières, de dégagements gazeux;

Les *gouttes froides*, provenant du refroidissement trop brusque d'une partie du métal;

Les *criques*, provenant d'un moule fait dans de mauvaises conditions, de masselottes d'alimentation trop faibles, d'un retrait trop important, etc.

III. — TRAITEMENTS DES ALLIAGES

Les différents traitements que les alliages peuvent subir en vue d'acquérir la forme et les propriétés commerciales voulues sont de trois catégories :

1° *Traitements mécaniques;*

2° *Traitements thermiques;*

3° *Traitements chimiques.*

1° **Traitements mécaniques.**— Les principaux traitements mécaniques que peuvent subir les alliages sont : le laminage, le martelage, l'étirage, l'ébarbage, le polissage.

Le laminage et le martelage prennent le lingot brut de coulée et l'amènent sous une forme et à des dimensions déterminées.

Les alliages qui peuvent subir ce traitement se partagent en deux groupes :

1° Les alliages qui se laminent et se martèlent à chaud : les aciers au carbone, de nombreux aciers spéciaux, certains laitons (alliages de cuivre et de zinc), quelques bronzes, etc.;

2° Les alliages se laminant et se martelant à froid : les laitons renfermant plus de 62 0/0 de cuivre, certains bronzes (moins de 10 0/0 d'étain), des melchiors (cuivre-nickel-zinc), etc.

Il arrive qu'un alliage peut subir le traitement dont nous parlons soit à froid, soit à chaud. Nous citerons comme exemples les laitons renfermant de 58 à 61 0/0 de cuivre.

Il ne nous paraît pas nécessaire d'insister ici sur les prin-

cipes du laminage et du martelage, qui sont décrits dans tous les ouvrages de Métallurgie Générale.

L'étirage a pour but de parfaire la forme donnée aux barres par le laminage, voire même de donner au métal un profil que l'on ne peut obtenir dans le laminage. Les alliages et métaux qui peuvent subir ce traitement, lequel suit toujours le laminage, sont assez nombreux et correspondent sensiblement à ceux qui se laminent.

Le principe de l'étirage consiste essentiellement dans le passage de la barre métallique à travers une filière dont le diamètre est inférieur à celui de la barre primitive. L'extrémité de la barre préalablement diminuée de diamètre est passée dans la filière et pincée dans un appareil de traction qui force toute la barre à s'allonger et à diminuer de diamètre en passant par la filière. Ordinairement la passe a pour effet de diminuer de 2 millimètres environ le diamètre de la barre. La traction peut être obtenue soit au moyen d'une chaîne de galle sans fin sur laquelle on vient, par un contrepoids, accrocher l'appareil à griffes (banc à tirer ordinaire), soit au moyen d'un banc hydraulique qui donne un effort plus régulier.

La filière peut épouser des formes très différentes suivant le profil que l'on veut obtenir; on peut même aider son travail par un outil qui enlève le métal, pendant que la barre est tractionnée, aidant ainsi à l'obtention du profil final.

L'ébarbage et le polissage sont des traitements qui n'ont pour but que d'améliorer la surface donnée par coulée et notamment d'enlever toutes les bavures et de régulariser les surfaces qui rejoignent la pièce aux masselottes. Le polissage a souvent, il est vrai, pour but de donner à la surface de la pièce un brillant spécial, voire même de la préparer à un traitement ultérieur, tel que le nickelage. De toutes façons, ces traitements ont lieu par l'intermédiaire de meules en émeri, carborundum, etc., de brosses, etc.

L'influence du laminage et du martelage est de la plus haute importance; dans ces traitements, les grains du métal sont resserrés et l'alliage possède des propriétés tout autres que

lorsqu'il est brut de coulée. La charge de rupture a généralement augmenté; il en est de même des allongements.

Voici l'exemple d'un laiton spécial. Brut de coulée, il a donné :

R	37
E	17
A 0/0	25

Laminé à chaud, étiré et recuit (nous verrons plus loin l'influence du recuit) :

R	45
E	18
A 0/0	30

Il est même des alliages pour lesquels l'influence du laminage est encore beaucoup plus importante.

Quant à l'étirage, il occasionne dans le métal un état d'écrouissage plus avancé que dans le laminage. Si l'on considère le métal laminé et le métal étiré, on trouvera une augmentation de la charge de rupture et une diminution très nette des allongements.

Voici, par exemple, un alliage (celui déjà cité), qui nous a donné :

Brut de laminage, c'est-à-dire laminé et non recuit :

R	49
E	22
A 0/0	25

Brut d'étirage, l'étirage ayant été fait sur le métal laminé :

R	57
E	27
A 0/0	12

Il est de toute évidence que la différence des propriétés du

métal laminé et du métal étiré seront d'autant plus accentuées que la passe d'étirage aura été plus forte [1].

Nous verrons d'ailleurs plus loin les études si intéressantes qui ont été faites, à ce point de vue, sur quelques métaux ou alliages. Mais nous tenons d'ores et déjà à signaler que l'écrouissage produit parfois une véritable transformation intermoléculaire; nous en verrons des exemples frappants à propos des aciers au nickel, au manganèse, etc.

2° **Traitements thermiques.** — Les principaux traitements thermiques que peuvent subir les métaux ou alliages sont :

Le *recuit*, la *trempe* et le *revenu*.

Dans le traitement du *recuit*, le métal est porté à une température qui dépend essentiellement de la nature du métal ou de l'alliage, mais qui est toujours assez élevée.

Le recuit a pour effet de détruire complètement l'influence des traitements mécaniques ou physiques déjà subis par le métal. C'est ainsi que, si le métal a été laminé, martelé ou étiré, le recuit aura pour effet de détruire l'état d'écrouissage dans lequel se trouve le métal; on voit alors la charge de rupture et la limite élastique diminuer, tandis que les allongements augmentent. Voici, par eexmple, un alliage qui, écroui, donnait:

R	57
E	27
A 0/0	12

et qui, après recuit complet, c'est-à-dire recuit ayant détruit entièrement l'écrouissage, a fourni :

R	45
E	18
A 0/0	30

Il est bien évident que l'effet du recuit est d'autant plus sensible que l'effet de l'écrouissage a été plus important.

1. Cette expression — passe d'étirage — signifie la diminution de section amenée dans la barre par étirage, sans qu'il y ait de recuit.

Le recuit a aussi pour effet de détruire les tensions internes qui ont pu être développées par certains traitements : forgeage, martelage, matriçage, etc. Enfin, il détruit aussi les effets d'un traitement spécial que nous allons étudier et que l'on appelle la *trempe*. Pour bien définir l'influence du recuit et de l'écrouissage, nous résumerons les principaux résultats obtenus par M. André Le Chatelier, qui est arrivé à montrer qu'un métal possède une limite d'écrouissage qui est pratiquement atteinte pour une déformation relativement faible et qu'il est impossible de dépasser, quelle que soit la déformation ultérieure que l'on impose au métal.

On peut ajouter que, pour tous les métaux étudiés par M. André Le Chatelier (sauf pour l'argent), la charge de rupture, après écrouissage complet, est le double de celle obtenue après recuit complet.

ALLIAGES	CHARGE DE RUPTURE	
	Après recuit complet	Après écrouissage complet
Cuivre[1]	25 kilos	51 kilos
Nickel[1]	55 —	105 —
Aluminium	12 —	25 —
Argent	18 —	38 —
Cadmium	$2^{kg},5$	5 —

Les impuretés ont pour effet d'élever la limite d'écrouissage.

« Si l'on examine ce qui a lieu pour les alliages, on observe, dit M. André Le Chatelier, que pour les uns l'écrouissage reste limité comme pour les métaux simples : c'est le cas du maillechort et du laiton; ces produits se tréfilent indéfiniment sans

1. Les chiffres donnés pour le cuivre et le nickel recuits nous semblent trop élevés. — On doit admettre 21 kilogrammes pour le cuivre et 50 kilogrammes maximum pour le nickel.

recuit, à condition que chaque passage à la filière ne produise qu'une faible réduction de diamètre; d'autres, au contraire, en particulier, les bronzes d'étain, les bronzes et laitons d'aluminium, les alliages de cuivre et d'argent, etc., se comportent tout différemment : chaque passage à la filière augmente leur résistance et diminue leur malléabilité, et l'on arrive rapidement à un état où le métal est complètement fragile et ne peut plus se tréfiler; ainsi, pour les bronzes à 10 0/0 d'étain ayant, après recuit complet, une résistance de 36 kilogrammes, la résistance croît régulièrement à chaque passage de la filière ; mais je n'ai pu dépasser le chiffre de 125 kilogrammes, le métal étant devenu trop brisant et n'ayant plus aucune malléabilité. Il y a à ce point de vue des différences très intéressantes. »

M. A. Le Chatelier a étudié également l'influence du recuit en général, et il est arrivé aux résultats suivants :

1° Le recuit n'est pas un phénomène instantané; ses effets s'accentuent à mesure que sa durée augmente; rapide au début, il devient de plus en plus lent, et la diminution d'écrouissage qu'il produit tend vers une limite déterminée à chaque température ;

2° La limite vers laquelle tend l'écrouissage sous l'action du recuit est d'autant plus faible et est en pratique atteinte d'autant plus rapidement que la température de recuit est plus élevée ;

3° A partir d'une certaine température, le recuit est pratiquement complet et une nouvelle élévation de température ne produit pas une nouvelle diminution de la charge de rupture, qui a alors atteint la valeur la plus faible dont le métal soit susceptible. A partir de cette température, il peut se produire ce que M. A. Le Chatelier a appelé la *cristallisation par recuit*, phénomène qui s'accentue avec la durée du recuit et a pour effet d'abord de diminuer la striction, puis, s'il est assez prononcé pour la faire disparaître, de diminuer simultanément la charge de rupture et l'allongement. Le métal se rapproche alors de l'état qu'il avait après simple fusion ;

4° Les impuretés ont pour effet de retarder le recuit; le métal le plus pur est celui qui atteint le plus rapidement sa

limite de recuit à une température donnée et pour lequel la température de recuit complet est la plus basse;

5° La cristallisation par recuit est causée par les impuretés existant dans le métal et dont le point de fusion est inférieur à celui du métal, ou qui forment avec lui des composés jouissant des mêmes propriétés.

Nous verrons, au chapitre des *Laitons*, l'étude fort intéressante de M. Charpy sur ce point.

Enfin, il n'est pas inutile de dire ici quelques mots d'un phénomène spécial étudié par M. André Le Chatelier et auquel il a donné le nom de *recuit spontané :* si, après avoir obtenu un métal écroui par un procédé quelconque, on l'abandonne à lui-même, il se recuit peu à peu sous l'influence du temps, ce que l'on constate par une augmentation de la malléabilité et même par une réduction de la charge de rupture. On a ainsi observé que des fils de cuivre ou d'argent écrouis au maximum avaient, au bout de plusieurs heures, une résistance inférieure de 3 à 4 kilogrammes à celle qu'ils possédaient immédiatement après le passage à la filière.

C'est ce phénomène qui explique la limite de l'écrouissage et ce fait que les métaux simples sont indéfiniment déformables. L'écrouissage ne pourrait pas, en effet, rester limité si, à partir d'un certain moment, tout accroissement produit par une nouvelle déformation n'était pas détruit par un effet de recuit équivalent et de sens contraire. Le tréfilage met très nettement en évidence le recuit spontané; si on veut pour du cuivre, par exemple, produire à chaque passe une réduction de diamètre prononcée, le fil se brise au bout d'un petit nombre de passes, parce que l'écrouissage intense que l'on produit momentanément lui enlève toute déformabilité; si, à chaque passe, on ne produit qu'une faible réduction de diamètre, on a encore des ruptures si les passes sont faites à de courts intervalles; si, au contraire, on laisse le fil se reposer un certain temps, cinq ou dix minutes entre chaque passe, on peut l'étirer indéfiniment. On pourrait, par des essais de compression, mettre ces faits en évidence d'une façon plus précise :

ainsi, si on comprimait un cylindre de cuivre sous l'action d'une charge légèrement supérieure à l'écrouissage maximum, on le verrait s'écraser indéfiniment et lentement sous l'influence du recuit.

M. André Le Chatelier a indiqué encore une autre conséquence directe du recuit spontané.

Le *recuit spontané* joue un rôle considérable dans les propriétés mécaniques des métaux, non seulement par suite de ce fait qu'il limite l'écrouissage et donne aux métaux une déformabilité indéfinie, mais aussi parce qu'il est la cause de l'influence du temps sur ces propriétés mécaniques, influence qui consiste en ce que :

1° La charge de rupture d'un métal à une température donnée est d'autant plus élevée que la vitesse de traction est plus grande;

2° La déformation que prend un métal sous l'action d'une charge ne se produit pas instantanément; elle continue à croître sous l'action du recuit spontané; mais, conformément aux lois du recuit indiquées ci-dessus, elle va en croissant de moins en moins vite, en tendant vers une limite déterminée quand il s'agit d'une charge inférieure à celle dont l'action prolongée amène la rupture. Cette double influence du temps est très apparente pour tous les métaux à une température plus ou moins élevée; dès la température ordinaire elle est très nette pour les métaux, tels que le cuivre, l'argent, l'aluminium. Mais le métal qui en donne l'exemple le plus remarquable est le zinc. « J'ai observé, dit M. André Le Chatelier, qu'un fil de zinc qui pouvait supporter pendant deux ou trois secondes une charge de 20 kilogrammes par millimètre carré se brisait sous l'action d'une charge de 6 kilogrammes seulement au bout de onze secondes, en s'allongeant, progressivement, sous l'influence du recuit spontané, de 173 0/0.

En raison de ces divers effets, le recuit est la principale base de l'étude des propriétés mécaniques des métaux; il donne avec l'influence propre à la température, en raison de la diminution de résistance qu'elle produit en s'élevant et avec les

perturbations causées par l'existence de modifications allotropiques pour certains métaux, l'explication de tous les faits que l'on peut avoir occasion d'observer.

La *trempe* est un traitement basé sur le refroidissement brusque d'un métal, préalablement porté à une certaine température.

Ce traitement est particulièrement intéressant pour les aciers. Nous montrerons, plus loin, qu'il s'applique également aux bronzes et aux alliages de cuivre et d'aluminium.

La trempe a toujours pour effet de maintenir le métal presque totalement dans l'état où il se trouve au moment où on le trempe[1] : si l'effet n'est pas complet, cela provient de ce que la vitesse de refroidissement n'est pas toujours suffisante.

On conçoit aisément que l'effet de la trempe sur les propriétés d'un métal ou d'un alliage dépende essentiellement des trois facteurs suivants :

1° La composition de l'alliage;

2° La température de trempe;

3° La nature et le volume du bain de trempe.

1° La composition des alliages a une influence prépondérante. Il est bien certain qu'un métal qui ne se transforme pas pendant le chauffage — tel le cuivre — ne subira pas plus de changement par trempe que par recuit.

Un exemple frappant de l'influence de la composition sur l'effet de la trempe est donné par les alliages de fer et de carbone, lesquels sont d'autant plus sensibles à ce traitement qu'ils renferment plus de carbone; la charge de rupture et la limite élastique augmentent d'autant plus, après trempe, les allongements et les strictions diminuent d'autant plus que le carbone est en quantité plus importante.

2° La température de trempe a également une influence des plus grandes, puisque, dans ce traitement, le métal est maintenu à l'état où il se trouvait au moment de la trempe,

1. Voir à ce sujet l'étude de M. Grenet parue dans le *Bulletin de la Société de l'Industrie minérale*, juin 1905, et qui contredit cette façon de voir.

c'est-à-dire à la température à laquelle il a été porté.

On sait fort bien qu'un acier à outils porté à 600° n'est pas trempé et qu'il faut une température de 750° environ pour que l'effet soit produit.

3° Enfin, la plus ou moins grande transformation apportée dans le métal par la trempe dépend de la vitesse de refroidissement; or cette vitesse est variable avec le bain de trempe utilisé. Celui-ci sera d'autant plus actif, produira une trempe d'autant plus vive que :

α) Sa température sera plus basse ;

β) Sa conductibilité sera plus grande ;

γ) Son volume sera plus important, du moins jusqu'à un certain point ;

δ) Sa volatilisation par immersion du métal chaud sera moindre ;

ε) La conductibilité de ses vapeurs sera plus faible;

η) Sa viscosité sera moindre.

On conçoit alors que les recettes de bains de trempe soient extrêmement nombreuses. Les bains les plus usités sont : l'eau, l'eau chargée de chaux, l'eau chargée de sels (chlorhydrate d'ammoniaque, chlorure de sodium, etc.), l'acide sulfurique, l'acide phénique, les huiles minérales, l'huile de colza, le plomb fondu, etc.

Il nous est impossible d'entrer ici dans plus de détails sur la trempe ; nous donnerons à propos des divers alliages l'influence de ce traitement.

Le *revenu* est un recuit fait à basse température. Il ne s'emploie guère que pour les aciers et même que pour les aciers trempés. Il a pour but de détruire les tensions internes et de diminuer la fragilité qu'occasionne toujours une trempe vive.

On dira pratiquement qu'un acier a subi un revenu lorsqu'il a été porté à une température inférieure à 700°[1].

1. Plus régulièrement on dirait qu'un acier a subi le revenu, lorsqu'après trempe il a été porté à une température inférieure à son premier point de transformation.

Pour bien montrer l'influence de ce traitement, nous citerons les résultats obtenus sur un acier chrome-nickel dont l'analyse a donné :

C = 0,330, Si = 0,260, Mn = 0,435, Ni = 2,430, Cu = 0,423

On est parti d'un métal trempé à 850°, qui a donné :

	R	E	A 0/0
Trempé à 850°	145	133	4
— Revenu à 300° environ...	140	130	6
— — 425° — ...	125	115	8
— — 500° — ...	110	95	11
— — 550° — ...	100	80	13
— — 600° — ...	90	65	15
— et recuit à 850°	70	45	22

On voit que, la température de revenu augmentant, la charge de rupture et la limite élastique diminuent, tandis que les allongements et les strictions augmentent.

On conçoit l'intérêt considérable d'un tel traitement.

3° **Traitements chimiques.** — Les principaux *traitements chimiques* peuvent avoir pour but :

α) D'affiner la surface du métal : tel le décapage[1] ;

β) D'introduire ou d'enlever à l'alliage un élément : cémentation des aciers, décarburation des mêmes alliages, fabrication de la fonte malléable, fabrication des fils de laiton par cémentation du cuivre dans la vapeur de zinc.

Le *décapage* a pour but de créer une surface très nette qui permette un traitement ultérieur ou d'améliorer l'aspect extérieur du produit métallurgique. Nous citerons, comme exemple du premier cas, le décapage des barres d'acier, de laitons, de melchiors, etc., avant l'étirage ; il a, pour effet, d'enlever la couche d'impuretés (oxydes, sulfures, etc.), qui a pris naissance dans les opérations précédentes (laminage, recuit, etc.). Comme exemple du second cas, on peut citer le

1. On peut ranger dans cette catégorie les dépôts galvanoplastiques : cuivrage, nickelage, etc.

décapage que l'on fait subir aux planches de laiton avant de les livrer au commerce.

La cémentation a pour effet d'introduire dans un métal ou dans un alliage un élément étranger. Cette opération est extrêmement importante, surtout pour les aciers. Nous l'avons analysée au point de vue théorique et pratique dans un long mémoire présenté à la Société des Ingénieurs civils de France (février 1904); nous y avons relaté les expériences que nous avons faites. Elles ne sauraient trouver place ici.

Disons, toutefois, que, pour les aciers, cette opération a pour but de carburer la surface, de telle sorte que l'on ait une pièce dont l'âme soit à faible teneur en carbone, tandis que la périphérie en renferme environ 0,800 à 1 0/0. En trempant une telle pièce, la surface acquiert une dureté superficielle remarquable, tandis que l'âme reste nerveuse et non fragile, si l'opération a été faite dans de bonnes conditions.

Il faut donner à la cémentation une signification plus générale que celle indiquée plus haut. Il faut admettre, en effet, que le phénomène bien connu de la pénétration du fer par le carbone a lieu avec d'autres éléments, aussi bien pour le fer que pour d'autres métaux.

On sait déjà depuis fort longtemps qu'un morceau de cuivre abandonné dans de la vapeur de zinc se laisse pénétrer par ce produit. Des expériences récentes que nous avons faites sur des bronzes ont montré qu'il en est bien de même avec l'étain : nous avons chauffé une barre de cuivre ajustée dans une barre de bronze à 10 0/0 d'étain ; au bout d'un certain temps, la ligne de démarcation entre le bronze et le cuivre n'existait plus au microscope.

De même, nous avons obtenu la cémentation du fer par le nickel, mais le phénomène a une vitesse faible.

Enfin on a parlé de la cémentation du fer par le silicium, l'arsenic, etc. Il peut évidemment paraître osé, étant donné le nombre restreint d'expériences qui ont été faites à ce sujet, de formuler une appréciation générale. On peut toutefois dire qu'il ne paraîtrait pas surprenant, dans l'état actuel de la science,

qu'un corps A soit susceptible de cémenter un métal B à une température T, lorsqu'à cette température T les corps A et B forment une solution solide.

Il arrive parfois que le traitement ait pour but non pas d'ajouter un élément, mais bien d'en enlever un. Un exemple industriel intéressant est celui de la fabrication de la fonte malléable, bien que son importance diminue beaucoup. Le principe de cette fabrication est essentiellement le suivant : les pièces sont moulées en fonte, puis elles sont soumises à un recuit en présence d'oxyde de fer ; il y a alors décarburation, et le métal s'adoucit.

PROPRIÉTÉS DES ALLIAGES

Nous nous proposons seulement de démontrer par des exemples que l'on ne peut nullement raisonner sur les propriétés des alliages en adoptant comme point de départ les propriétés des métaux constituants. Nous renvoyons à notre premier livre sur l'*Étude théorique des Alliages métalliques* pour les détails complémentaires.

Fusibilité. — Généralement l'introduction d'un métal en petites quantités dans un autre métal abaisse son point de fusion. Il y a des alliages qui fondent à température beaucoup plus basse que le plus fusible des métaux constituants. Nous citerons : l'alliage

Sn	63
Pb	37

qui fond à 182° ;

L'alliage qui correspond à la composition

Pb	45
Bi	55

et qui fond à 118°.

Certains alliages possèdent un point de fusion bien supérieur à celui du moins fusible des métaux constituants.

Nous citerons l'alliage d'antimoine et d'aluminium composé de :

Sb........................	15
Al..........................	85

qui fond à 1.050°, bien que les métaux constituants fondent à 630° et 650°.

Points de transformation. — Les points de transformation que présentent les métaux constituant un alliage peuvent varier considérablement avec sa composition.

Nous verrons que le nickel et le manganèse abaissent considérablement les points de transformation du fer, tandis que le silicium et l'aluminium les relèvent.

Résistance électrique. — On sait que l'on observe des variations brusques dans la résistance électrique des alliages binaires lorsqu'on fait varier leur composition. On a mis ainsi en vue les combinaisons $SnCu^3$, SnAu, etc.

Magnétisme. — On connaît des alliages non magnétiques, bien que renfermant un métal magnétique, tels que certains alliages nickel-cuivre, fer-manganèse, aluminium-fer, etc. On connaît même des alliages non magnétiques formés de métaux magnétiques : tels certains aciers au nickel. Enfin on a appris, ces derniers temps, l'existence d'alliages magnétiques formés de métaux non magnétiques à la température ordinaire ; ce sont les alliages aluminium-manganèse, manganèse-étain, dont nous parlons plus loin (chap. xxix).

Dilatation. — Le meilleur exemple que l'on puisse donner de la variation de la dilatation des alliages avec leur composition, est celui des alliages fer-nickel. Nous y revenons en détail dans le chapitre des *Aciers spéciaux*.

Propriétés mécaniques. — Les exemples d'alliages qui ont des propriétés mécaniques tout autres que les métaux constituants sont tellement nombreux que l'on ne sait quel choix faire. Faut-il rappeler que certains alliages d'aluminium et de

fer, d'aluminium et de nickel, d'aluminium et de cobalt, etc., tombent en poussière d'eux-mêmes en quelques heures? D'autre part, l'on sait que les métaux aussi cassants que le zinc donnent des alliages extrêmement ductiles, comme le laiton.

Enfin nous étudierons plus loin les propriétés que donne le nickel aux aciers, propriétés qui varient d'une façon extraordinaire avec le pourcentage.

Densité. — Nous n'insistons pas sur ce point; on sait, en effet, que certains alliages se forment avec contraction ou dilatation. Souvent, d'ailleurs, l'écart est de l'ordre de grandeur des différences observées sur un même métal.

Couleur. — La coloration des alliages est parfois très différente de celle des métaux constituants; les laitons sont parfois verdâtres, les bronzes d'un beau brun ou d'un or très prononcé ; mais les exemples les plus typiques d'alliages ayant une couleur très différente de celle des métaux constituants sont donnés par certains alliages cuivre-antimoine qui sont d'un beau violet et des alliages argent-cadmium qui sont d'un or violacé très accusé.

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE II

Commission des méthodes d'essais, Travaux divers, Dunod, éditeur (*Propriétés et essais*).

Combes, *Revue de Métallurgie*, janvier 1905 (*Fours électriques*).

Ditte, *Introduction à l'étude des Métaux*, Société d'éditions scientifiques, 1902 (*Généralités*).

Percy, *Métallurgie*, Bérenger, éditeur (*Généralités*).

Guettier, *Guide du Fondeur*, Bernard, éditeur (*Généralités*); — *les Alliages métalliques*, Hetzel et C[ie] (*Id.*).

Guillet, *Étude théorique des Alliages métalliques*. Dunod; — *Génie civil*, XLI, 9 à 12, 1902 (*Constitution et propriétés*).

Hiorns (Traduit par Boudouard), *les Alliages métalliques*, Steinheil, 1900 (*Généralités*).

Howe, *Fabrication de l'acier*, Bérenger, 1894 (*Fours de sidérurgie*).

Irresberger, *Stahl Und Eisen*, 1[er] février 1904 (*Four Piat-Baumann*) ; — *Id.* (*Four Leifert-Bosshardt*).

Von Juptner, *Éléments de sidérologie*, Bérenger, 1905 (*Généralités*).

Knab, *les Alliages métalliques*, Steinheil, 1892 (*Généralités*).

Krupp, *Die Legierungen* (*Id.*).

Ledebur, *Manuel de la métallurgie du fer*, Bérenger, 1904 (*Fours de sidérurgie*).

Longmuir, *Iron and Steel Institute*, mai 1903 (*Influence des traitements sur les alliages*).

Saladin, *Revue de Métallurgie*, janvier 1905 (*Fours électriques*).

Schnabel, *Traité de métallurgie générale*, Bérenger, éditeur (*Fours divers*).

Société d'Encouragement pour l'industrie nationale, *Contribution à l'étude des alliages* (*Propriétés*).

Spring, Congrès de Physique de 1900, I, 402; — *Journal de Chimie Physique*, I, 1904, 593 (*Préparation*).

The Metal Industry, 1904 et 1905 (*Fours divers*).

CHAPITRE III

ALLIAGES DE FER ET DE CARBONE
ACIERS, FONTES

I. — ÉTUDE THÉORIQUE

Dans le volume que nous avons publié, *Étude théorique des Alliages métalliques*, nous avons toujours cité comme exemples les alliages de fer et de carbone.

Nous ne pouvons que reproduire ici le résumé que nous avons fait des principales recherches effectuées sur ce sujet, en développant certains points sur lesquels nous n'avions peut-être pas assez insisté ou certains travaux qui viennent seulement de paraître, notamment ceux de M. Bénédicks et du *Physical Laboratory*, de Londres.

Courbes de fusibilité et de refroidissement. — Tschernoff est le premier qui ait signalé l'existence de températures apportant des transformations dans l'acier. Il assimilait l'acier liquide à une solution saturée de sels cristallisables et était conduit à considérer quatre températures intéressantes : le point de fusion ; une seconde température qui en est assez voisine et au-dessus de laquelle l'acier est brûlé ; un troisième point important, qui est celui auquel l'acier passe de l'état cristallin à l'état amorphe et qui correspond au rouge vif ; enfin, le quatrième point, lequel se trouve au rouge sombre, est la tempé-

rature minimum à laquelle l'acier doit être porté pour prendre la trempe[1].

Telle est, très brièvement résumée, la théorie de Tschernoff émise en 1868 et publiée, en France, en 1876.

En 1885, parut l'important mémoire de MM. Osmond et Werth sur la théorie cellulaire des aciers, qui apportait beaucoup plus de netteté dans cette question si importante de la constitution de ces produits. MM. Osmond et Werth donnent d'abord la notion de la cellule, constituée par un noyau de fer doux enveloppé d'un ciment, qui est une combinaison de carbone et de fer[1].

Ce sont ces cellules, dites simples, dont la juxtaposition va former les cellules dites composées, qui auront en quelque sorte comme caractéristique de n'être enveloppées que de quantité fort minime de ciment, et ce sont ces dernières qui, ne possédant pas ou peu de ciment, vont déterminer les points de faible résistance dans le métal brut de coulée.

Mais on pourra faire disparaître la plus grande partie de ces cellules en travaillant l'acier par forgeage, laminage, tréfilage, etc., à une température convenable, température à laquelle le ciment sera devenu pâteux.

Là n'est pas le seul fait intéressant de la théorie cellulaire, il en est deux autres d'une importance beaucoup plus grande. Le premier réside dans la dissociation ou dissolution dans le fer du ciment, c'est-à-dire du carbure de fer, à une certaine température. Au-dessus de cette température, le carbone sera dissous dans le fer.

De ce fait, on peut conclure qu'à cette température le métal sera beaucoup plus homogène, et, si l'on veut bien se rappeler que l'effet de la trempe[2] est de maintenir l'acier, tout au moins en partie, à l'état sous lequel il se trouvait au moment où il a été brusquement refroidi, on comprendra que la trempe rend le métal très homogène.

1. La même année, Brinell a publié, dans le *Stahl und Eisen*, une étude intéressante sur les transformations des aciers.

2. Il faut, comme nous l'avons déjà dit, entendre par trempe d'un métal le traitement qui consiste à porter le métal à une température assez élevée (750° à

Mais il y a plus : si l'on considère un acier refroidi lentement, on peut en isoler, par des réactifs appropriés, des lamelles qui correspondent à la formule Fe^3C et on pourra voir que, dans un tel acier, la plus grande partie du carbone, si ce n'est la totalité, est, sous cet état, dit *carbone combiné*.

Si l'on trempe un acier chauffé au rouge cerise dans l'eau à environ + 15°, on s'aperçoit que l'on ne peut plus déceler le carbure de fer; tout le carbone est à un état spécial uniformément réparti dans la masse; nous sommes en présence du *carbone de trempe*.

Faraday fut le premier à constater cet état spécial du carbone dans les aciers trempés. Caron le précisa en montrant que l'acier trempé se dissout entièrement dans l'acide chlorhydrique dilué et froid, tandis que, dans les mêmes conditions, l'acier recuit abandonne un résidu noirâtre que l'on a ultérieurement reconnu pour être le carbure de fer Fe^3C.

De plus, M. Hogg d'abord [1], MM. Osmond et Werth, M. Carnot ensuite montrèrent qu'en attaquant, par l'acide azotique de concentration moyenne, suivant la méthode indiquée par Eggertz pour le dosage du carbone dans les produits sidérurgiques un acier trempé et un acier recuit, on obtenait des colorations d'une intensité très différente, celle-ci étant singulièrement faible dans le cas d'un acier trempé.

Cela semblait indiquer, d'ores et déjà, que le fer passait d'un premier état à un autre, sous lequel il était plus dur. On avait ainsi défini deux états du fer : l'état α, stable à température ordinaire ; l'état β, stable à température élevée et caractéristique des aciers trempés.

Tel était, après l'important mémoire de MM. Osmond et Werth, l'état de la question. Nous exposerons maintenant les progrès effectués par la théorie dans la voie tracée par ces savants ; à cet effet nous étudierons tout d'abord les différents états allo-

800° pour les aciers à outils) et à le refroidir brusquement en plongeant dans un bain (eau, huiles, acide sulfurique, eau phéniquée, mercure, plomb fondu) à température relativement basse. Le terme d'atelier *prendre la trempe* signifie que le métal durcit tout au moins superficiellement.

1. *Chemical News*, t. XLII, p. 131 ; 1880.

tropiques du fer, puis les phénomènes de la recalescence.

1° *États allotropiques du fer.* — Le fer semble exister sous trois états allotropiques différents ; ceci découle des différents travaux qui ont été faits successivement par MM. Pionchon, Osmond, Henry Le Chatelier et Roberts-Austen.

Les trois états allotropiques sous lesquels le fer est susceptible de se présenter ont été désignés, par M. Osmond, par les lettres α, β, γ.

Voici d'abord les conclusions auxquelles ont conduit ces travaux ; nous étudierons ensuite les diverses expériences qui les ont amenées.

Au-dessous de 740°, le fer est à l'état α ;

Entre 740° et 860°, il est à l'état β ;

Au-dessus de 860°, il est à l'état γ.

Empressons-nous d'ajouter qu'un quatrième et même un cinquième état du fer seraient possibles. En effet M. Ball semble avoir observé une transformation à 1.300°, laquelle a été vérifiée par M. Curie. D'autre part, Roberts-Austen a annoncé un autre changement à 600°, lequel a bien été retrouvé par le *Physical Laboratory* de Londres.

Laissons de côté, pour le moment, ces deux points et considérons seulement les trois états du fer α, β, γ.

Suivant la notation de M. Osmond, nous appellerons : A_2 (nous verrons plus loin pourquoi A_2 et non A_1) le point de 740°, A_3 le point de 860°.

Comment a-t-on été conduit à admettre ces trois états allotropiques du fer?

1° Si l'on examine les propriétés magnétiques du fer pur que l'on chauffe, on voit que ces propriétés s'atténuent considérablement à 740° (M. Curie, thèse de doctorat) ;

2° Si l'on suit la variation de résistance électrique d'un fer pur dont on élève peu à peu la température, on note que, tandis que cette résistance s'est décuplée quand la température a passé de 0 à 860°, elle reste sensiblement constante à cette température ;

3° Si l'on prend un morceau de fer et que l'on étudie sa

courbe de refroidissement, on notera des dégagements de chaleur, c'est-à-dire un ralentissement dans le refroidissement, aux températures d'environ 740° et 860°.

Si, comme l'a fait M. Osmond, on prend, pour tracer la courbe de refroidissement, comme abscisses, les températures, et comme ordonnées le nombre de secondes que met l'indice du galvanomètre pour baisser d'une division de la règle graduée, on obtient la courbe de la figure 43 (C = 0,020).

Cette courbe prouve que, pour baisser d'un degré dans les environs de 860°, il a fallu plus longtemps qu'à un autre moment et, par conséquent, qu'il y a eu un ralentissement dans le refroidissement.

Il en est de même à 740°, bien que le ralentissement soit beaucoup moins accentué.

Enfin nous devons noter un très léger rentlement à 680°, cette température correspondant au point A_1, dont nous verrons l'importance tout à l'heure.

4° L'étude des chaleurs spécifiques du fer aux différentes températures, qui a été faite par M. Pionchon (thèse de doctorat, 1886), présente des anomalies qui se traduisent par des absorptions de chaleur à peu près aux températures indiquées.

Il semble donc que le fer existe bien sous trois états.

MM. Osmond et Cartaud (*Annales des Mines*, 1900) ont préparé du fer sous ces états différents en réduisant le chlorure ferreux par l'hydrogène (méthode de Péligot) ou par le zinc (méthode de Pommarède). Ils sont arrivés aux conclusions suivantes :

Le fer à ses trois états cristallise dans le système cubique;

Le fer β et γ cristallisent identiquement ;

Le fer β ne se mélange pas isomorphiquement avec le fer α.

Il est juste d'ajouter que M. Le Chatelier n'est pas d'accord avec M. Osmond sur le système cristallin du fer γ. M. Le Chatelier pense que la forme vraie est celle d'un rhomboèdre très voisin du cube. Faisons, de plus, remarquer que l'on n'a pas encore isolé le fer β à l'état pur, qu'on ne l'a jamais obtenu que mélangé de certaines quantités de fer α.

Quelles sont les caractéristiques importantes du fer sous ces trois états allotropiques ?

Le fer α est magnétique; le fer β et le fer γ ne le sont pas.

Le fer α et le fer β ne dissolvent pas le carbone; le fer γ est susceptible de le dissoudre.

Ce sont là les caractéristiques les plus importantes en dehors de la résistance électrique, de la malléabilité, etc., que nous étudions plus loin en détail.

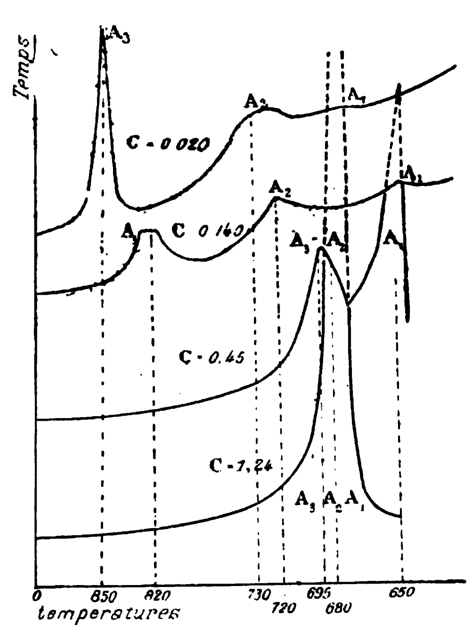


Fig. 43. — Points de transformation dans les alliages fer-carbone.

2° *Influence du carbone sur les points de transformation.* — Supposons, avec M. Osmond, que nous prenions des aciers contenant de plus en plus de carbone et que nous en étudiions les courbes de refroidissement. Pour un acier doux (C = 0,140 0/0), la courbe présentera trois points singuliers indiquant les ralentissements :

A_3 vers 820°;
A_2 vers 720°;
A_1 vers 650°.

En outre, nous remarquerons que le ralentissement qui a eu lieu vers 820° n'est plus, comme dans le cas du fer pur, indiqué par un point, mais bien par un palier.

Pour un acier mi-dur (C = 0,450 0/0), un ralentissement progressif a lieu à 695° et comprend les points A_3 et A_2.

La station est au point A_1 vers 650°.

Pour un acier dur (C = 1,240 0/0), il n'y a plus qu'une longue station A_3, A_2, A_1, à 680° environ.

Laissons de côté pour le moment le point A_1, sur lequel nous

insisterons ultérieurement, et notons qu'en ajoutant du carbone à du fer pur, nous arrivons à faire disparaître petit à petit le point A_3 et que le point A_2 ne disparaît que si l'on en ajoute beaucoup plus.

Or il est entendu que le point A_3 correspond au dégagement de chaleur qui a lieu lorsque le fer passe de l'état γ à l'état β.

On voit que, si on ajoute un peu de carbone, cette transformation subsiste ; mais, d'une part, la température à laquelle se fait cette transformation est plus basse ; d'autre part, l'échauffement est moindre.

Prenons un acier contenant, par exemple, 0,200 0/0 de C ; supposons-le à l'état liquide et voyons ce qui va se passer lorsqu'il va se solidifier. Lorsque nous avions du fer pur, ce fer, après s'être solidifié, se trouvait à l'état γ, tant que la température était supérieure à 860° ; puis, il était à l'état β entre 860° et 750° et au-dessous à l'état α.

L'acier à 0,200 0/0 de C, après s'être solidifié, aura son carbone dissous dans le fer γ jusqu'à une température un peu plus basse que 860°, jusqu'à 830° environ, d'après les indications données par la courbe de refroidissement. A cette température, le fer va commencer à passer à l'état β.

Comme le fer β ne dissout pas le carbone, le fer γ qui reste encore va s'enrichir en carbone, de telle sorte que l'on aura toujours du fer γ, ce dernier ayant dissous le carbone.

Plus la température baissera, plus il y aura de fer β à se déposer et, par conséquent, plus le fer γ s'enrichira en carbone.

Puis on atteindra la température de 750°, et alors le fer β se transformera subitement et entièrement en fer α.

On aura alors : fer α + fer γ + carbone dissous dans ce fer.

L'expérience montre que, pour une teneur de carbone de 0,350 0/0, le point A_3 disparaît complètement comme point indépendant.

On admettra qu'alors le fer passe directement de l'état γ à l'état α. Donc, si l'on envisage cet acier à 0,350 0/0 de carbone après solidification, il sera formé de fer γ + carbone dissous tant que

la température sera supérieure à 750°; au dessous il sera formé de fer α + fer γ ayant dissous le carbone, la richesse en carbone de ce fer étant de 0,350.

En résumé, à 750°, tous les alliages contenant entre 0 à 0,350 0/0 de C sont formés de fer α + fer γ ayant dissous 0,350 0/0 de C.

Il y a, de plus, un point très important à remarquer, c'est que le fer β, ne contenant pas de carbone, passera entièrement à la forme α, lorsque l'on arrivera à 750°; donc la température à laquelle le fer β se transforme en fer α est constante, quelle que soit la teneur en carbone pour les aciers qui contiennent du fer β.

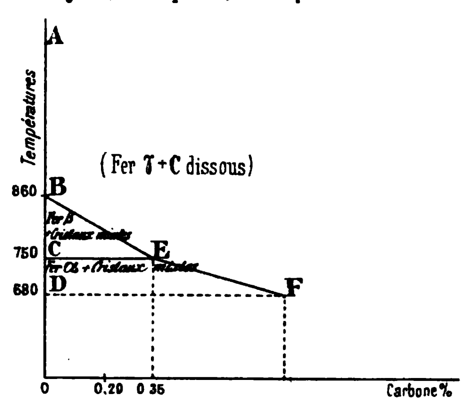


Fig. 44. — Diagramme des points de transformation des alliages fer-carbone.

Si on laisse refroidir au-dessous de 750° le mélange qui est formé de : fer α + fer γ + carbone dissous dans ce fer γ, il abandonne de nouveau du fer α et la teneur en carbone des cristaux mixtes augmente jusqu'à ce qu'elle ait atteint 0,850 0/0. Alors se fait une nouvelle transformation que nous allons étudier. Mais, avant, envisageons le cas d'un acier renfermant entre 0,350 et 0,850 0/0 de carbone[1].

Cet acier liquide va, quand la température s'abaisse, se solidifier, puis il sera formé de fer γ ayant dissous tout le carbone, jusqu'à ce qu'il atteigne une certaine température à laquelle ce fer γ va se transformer en partie en fer α; enfin, au-dessous de ce point, on aura du fer α + des cristaux mixtes : fer γ + carbone dissous.

En réunissant les divers points de cette transformation pour les aciers à diverses teneurs, on a le diagramme (*fig.* 44) qui

1. La verticale du point F correspond à 0,850 0/0 de carbone.

constitue l'une des parties les plus intéressantes du diagramme de Roozeboom sur lequel nous aurons à revenir.

On a donc quatre zones :

La première donne pour les aciers la composition : fer γ + carbone dissous.

La deuxième donne pour les aciers la composition : fer β + cristaux mixtes (fer γ + C).

La troisième donne pour les aciers la composition : fer α + cristaux mixtes (fer γ + C);

La quatrième zone correspond à un nouveau phénomène que nous allons étudier.

En résumé, BE est le lieu des points A_3; CE est celui des points A_2; EF, celui des points A_3, A_2; DF, celui des points A_1; et enfin FF_1 celui des points A_3, A_2 . A_1.

3° *Phénomène de la recalescence, carbure de fer, cémentite.* — En étudiant les courbes de refroidissement des aciers à différentes teneurs de carbone, nous avons noté un point vers 680°, caractérisé par un échauffement important, d'autant plus important que la teneur en carbone est plus élevée.

Ce point, dans la notation de M. Osmond, est désigné par A_1 ; le phénomène de grand retard au refroidissement pour les aciers est connu depuis fort longtemps ; ce retard au refroidissement s'accuse même par une élévation de température.

Des observations ont été faites par Gore et Barrett sur un acier dur, qu'ils ont chauffé petit à petit jusqu'au rouge vif. A une certaine température, on a remarqué un ralentissement très brusque dans la dilatation et, d'autre part, l'éclat du métal diminuait subitement. Si, au lieu d'observer ces faits à l'échauffement, on les observe au refroidissement, c'est-à-dire sur une barre qui a été portée à 900° environ et qu'on laisse refroidir lentement, on observe les phénomènes inverses, c'est-à-dire une augmentation subite de la dilatation et de l'éclat.

Ces phénomènes sont beaucoup plus sensibles au refroidissement qu'à l'échauffement parce qu'ils sont beaucoup plus

brusques[1]; il arrive même que la contraction et la chute de température peuvent être momentanément renversées : c'est l'augmentation d'éclat qui a fait donner à ce phénomène le nom de *recalescence*. Nous avons vu que, dans l'étude du refroidissement des aciers d'après la méthode de M. Osmond, ce phénomène est fortement accusé dans les courbes. Mais, suivant que l'on observe le phénomène au refroidissement ou à l'échauffement, on ne retrouve pas tout à fait la même température. Malgré cela le phénomène est bien le même. En effet MM. Osmond, Howe et Brinell n'ont jamais pu obtenir la recalescence au refroidissement, s'ils ne l'avaient pas obtenue auparavant à l'échauffement.

De plus, M. Osmond a montré que la température à laquelle se produisait le phénomène de la recalescence à l'échauffement est d'autant plus basse que la vitesse d'échauffement est plus lente et, dans les mêmes conditions, d'autant plus élevée au refroidissement.

Si donc on soumet une barre d'acier à un échauffement aussi lent que possible, on arrivera à avoir les températures de la recalescence à l'échauffement et au refroidissement très voisines, à 710° dans l'échelle des températures où le point de fusion de l'or est de 1.045°[2].

Qu'est-ce donc que le phénomène de la recalescence?

On sait depuis quelques années que le fer et le carbone peuvent se combiner pour donner un carbure de fer Fe^3C que l'on a nommé cémentite, parce que, comme nous le verrons, il prend naissance en quantités notables dans une cémentation suffisamment profonde.

Cette cémentite est obtenue, comme nous l'avons indiqué, par traitement des aciers recuits ou des fontes blanches par les acides.

D'autre part, Margueritte a isolé ce carbure de fer Fe^3C en

1. M. H. Le Chatelier, *État actuel des théories de la trempe de l'acier* (*Revue générale des Sciences*, 15 janvier 1897).
2. M. H. Le Chatelier, *Revue générale des Sciences*, 15 janvier 1897.

chauffant au rouge naissant de l'oxyde de fer très divisé dans l'oxyde de carbone.

Enfin, on peut l'obtenir dans des conditions qui ont été déterminées par M. Moissan, au moyen du four électrique. Mais il n'est pas possible d'avoir directement ce carbure en mettant le fer fondu en présence de carbone; ceci s'explique aisément par sa dissociation. Il est, au contraire, très facile d'obtenir, dans les circonstances analogues, le carbure de manganèse Mn^3C, ainsi que l'a démontré Hautefeuille.

L'existence de cette cémentite ne saurait donc être mise en doute. Parmi les propriétés de ce composé, la plus intéressante est, sans nul doute, la suivante : chauffé à 700°, il se dissocie en fer et carbone. Ceci explique pourquoi il n'est pas possible de le préparer par fusion du fer en présence du carbone.

D'autre part, on voit que la température à laquelle a lieu cette dissociation correspond justement au point A_1.

Prenons un acier à une certaine teneur en carbone, inférieure à 0,850 0/0. A la température ordinaire, cet acier sera formé de fer α et de cémentite. Cette cémentite ne sera pas dissoute puisque le fer α ne dissout ni carbone, ni carbure. On verra ultérieurement qu'elle forme avec le fer α un eutectique semblable au cryohydrate. Élevons la température : lorsque nous atteindrons environ 710°, la cémentite va se dissocier en fer et en carbone. Une partie du fer passe à l'état γ et va dissoudre le carbone; l'autre partie du fer reste à l'état α. Et ce sera le carbone provenant de la dissociation de la cémentite qui créera lui-même le fer γ nécessaire pour le dissoudre [1]. On sait déjà ce qui se passe aux températures supérieures.

En résumé, le point A_1 correspond à la dissociation de la cémentite. Il sera évidemment d'autant plus accentué dans la courbe de refroidissement que cette matière sera en plus grande abondance et, par conséquent, que la teneur en carbone sera

1. M. Osmond nous donnait, à ce sujet, un exemple très saisissant et faisant bien comprendre ce qui se passe ici : lorsqu'on ajoute du sel marin à de la glace, il se produit la quantité d'eau liquide nécessaire pour dissoudre ce chlorure de sodium.

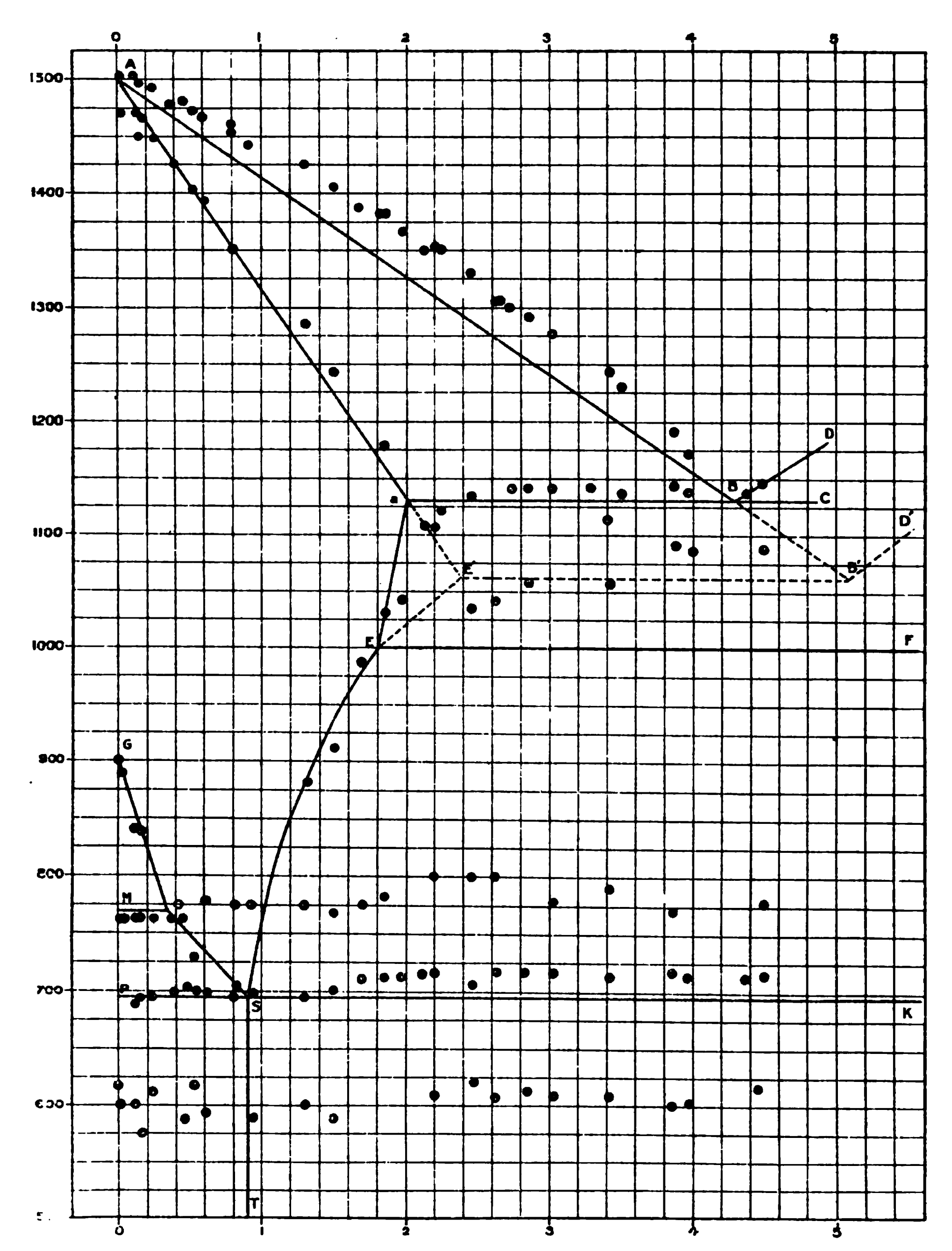


Fig. 43. — Diagramme de Roozeboom avec les déterminations de Carpenter et Keeling.

plus élevée. Cette transformation n'est pas instantanée, bien entendu. Elle commence à une certaine température, passe par un point où la vitesse de refroidissement est maximum et finit à une autre température.

L'intervalle qui sépare les deux températures extrêmes entre lesquelles le phénomène se passe est dit *intervalle critique*.

Nous avons déjà indiqué une partie du diagramme de Roozeboom. Il nous est nécessaire d'entrer dans quelques détails complémentaires. La figure 45 représente le diagramme complet.

Les droites AB et BD représentent les points de fusion commençant; les droites A*a* et *a*BC, les points de fusion finissant.

La droite SK représente le phénomène de la recalescence. Au dessous, les aciers renfermant entre 0,850 et 6,600 0/0 de carbone sont formés de perlite et de cémentite; ceux qui contiennent plus de 6,600 0/0 de carbone, de cémentite et de graphite. Nous savons ce qu'il en est pour les aciers hypoeutectoïdes.

La courbe SE indique la température à laquelle il faut tremper les aciers renfermant plus de 0,850 de carbone pour amener tout le carbone en solution et faire disparaître la cémentite. Au-dessus de la ligne EH et au-dessous de la ligne *ac*, on obtient un mélange martensite-graphite.

Cette question si importante des points de solidification et de transformation des alliages fer-carbone vient d'être reprise tout dernièrement par MM. Carpenter et Keeling, qui ont fait au National Physical Laboratory des déterminations d'une précision remarquable (Iron and Steel Institute, mai 1904).

Les résultats obtenus sont reproduits dans la figure 45.

La courbe moyenne de ces résultats est tracée en trait discontinu.

Le diagramme de Roozeboom est en trait plein.

Les principales modifications apportées à ce diagramme sont les suivantes :

1° Le point de fusion du fer est à 1.505°;

2° AB est une ligne légèrement courbée, un peu convexe vers le haut;

3° *a*B n'est pas une ligne horizontale, mais s'élève de *a* vers B ;

4° SE peut être représenté aussi bien par une ligne droite que par une courbe ;

5° PK n'est pas une ligne droite, mais s'élève de P vers K.

Il faut surtout noter :

1° Une petite transformation thermique à environ 790° pour les alliages d'une teneur en carbone de 0,8 à 4,5;

2° Un changement thermique lent à environ 600° trouvé sur tous les aciers. C'est le point découvert par Roberts-Austen.

Le premier de ces points est tout à fait nouveau. Il est à espérer qu'une connaissance plus approfondie de l'équilibre des diverses phases des aciers fer-carbone permettra de l'expliquer.

Métallographie (*Album de Micrographie,* Pl. I à IX). — Les constituants actuellement admis pour les aciers au carbone sont[1] :

La *ferrite* ou fer pur;

La *cémentite* ou carbure de fer Fe^3C ;

La *perlite*, qui est l'eutectique ferrite-cémentite et qui doit son nom à ce que, vu en lumière oblique, ce constituant a l'aspect nacré de la perle;

La *martensite*, dédiée par M. Osmond au professeur Martens.

Ce n'est pas un composé défini ; c'est une solution de carbone dans le fer; le carbone peut y être en plus ou moins grande quantité. En France, on a nommé longtemps *hardenite* la martensite saturée de carbone. Mais ce nom a été réservé depuis à la martensite correspondant à l'acier eutectique ;

L'*austenite* dédiée à Roberts-Austen ;

La *troostite*, du nom de M. Troost, professeur honoraire en Sorbonne ;

La *sorbite*, dédiée à Sorby, le premier savant qui ait songé à la métallographie ;

1. Nous sommes particulièrement heureux de signaler qu'au dernier meeting de l'*Irond and Steel Institute* MM. Arnold et Williams, de Sheffield, deux des rares *carbonistes* existant encore, ont reconnu, mais sans l'avouer, la théorie allotropique et l'existence des constituants des aciers trempés.

Le *graphite*, qui se dépose lorsque les produits sont fortement carburés.

Ferrite (Album, Pl. II, Phot. 5). — La ferrite apparaît en grains polyédriques par une attaque à la teinture d'iode, à l'acide picrique, etc.

Les grains sont souvent colorés ; ils sont formés d'autant de cristaux cubiques qui se sont développés autour de centres indépendants et ont été limités par des facettes plus ou moins planes (Andrews et Stead).

On applique le nom de ferrite au fer renfermant certains produits, tels que le nickel, le silicium, qui forment avec lui des solutions solides ou des mélanges isomorphes.

Ce point a été bien spécifié dans la *Nomenclature* officiellement établie par la commission nommée par le bureau de l'Iron and Steel Institute, sur l'initiative de M. Stead, et à laquelle nous empruntons de nombreuses définitions[1].

Dans un important mémoire (*Revue de Métallurgie*, mars 1904), M. Kourbatoff indique que l'acide azotique à 4 0/0 dans l'alcool amylique permet de distinguer dans les aciers extra-doux les produits fragiles des produits non fragiles; dans les premiers, le contour des grains de la ferrite est très net ; de plus, il paraît y avoir deux constituants. Ce dernier point mérite confirmation[2].

Cémentite (Album, Pl. III à VI, Phot. 12 à 23). — La cémentite constitue le plus dur constituant de la fonte et de l'acier recuit ; elle apparaît, par conséquent, par polissage en bas-relief. Elle ne se colore pas, lorsqu'on l'attaque à l'acide azotique dilué, l'iode, l'acide picrique, etc.

M. Sauveur distingue entre ce qu'il nomme la cémentite de ségrégation et la cémentite libre. La première est un des constituants de la perlite, la seconde est indépendante. La commission nommée par l'Iron and Steel Institute proposa justement d'éliminer le mot impropre de ségrégation et de

1. *Journal of the Iron and Steel Institute*, 1902, I, p. 90.
2. Voir à l'*Appendice* la remarquable étude de M. Braune sur le rôle de l'azote.

maintenir les expressions de perlite et de cémentite indépendante.

Cette dernière se colore en brun par le picrate de soude en solution sodique ; ce réactif a été découvert par M. Le Chatelier; l'acide picrique, par M. Igewski.

Perlite (Album, Pl. II à VI, Phot. 5 à 23). — La perlite est, comme l'on sait, l'eutectique ferrite-cémentite. Depuis les travaux de M. Charpy, on sait que tout eutectique est formé de lamelles alternantes des deux constituants. Nous devons donc voir, sous des grossissements assez forts, ces deux constituants en lamelles alternées. C'est bien ce qui arrive.

La perlite se colore en noir par la teinture d'iode et l'acide picrique; elle n'est que peu colorée par le picrate de soude.

Si l'on examine par voie micrographique des aciers bruts de forge contenant de plus en plus de carbone, on obtient les résultats suivants :

Tout d'abord dans les aciers extra-doux, ou mieux dans le fer, on rencontre souvent des grains de scorie; ces impuretés ont parfois une importance considérable, comme le montrent les photographies Pl. I, Phot. 1 à 4; on y distingue nettement deux éléments, dont il nous est impossible actuellement de préciser la nature [1].

Si l'on considère un acier renfermant peu de carbone, si on l'attaque lentement, avec l'acide picrique, par exemple, on verra tout d'abord de la perlite et, si l'on pousse plus loin l'attaque, on verra apparaître des polyèdres qui indiquent les grains de ferrite; on remarquera que la perlite se trouve sur les bords des polyèdres (Pl. II, Phot. 5).

Plus l'acier contiendra de carbone, plus la quantité de perlite sera importante; ce fait est démontré dans les photographies d'aciers à 0,055 0/0; 0,100 0/0; 0,185 0/0; 0,400 0/0 de carbone (Pl. II, Phot. 5 à 8, et Pl. III, Phot. 9).

Lorsqu'on arrive à 0,900 0/0 de carbone, on a de la perlite pure.

L'une de nos photographies représente un acier à 0,750 de carbone ; on y voit quelques îlots blancs de ferrite (Pl. III, Phot. 10).

1. Ce sont probablement des silicates.

Plusieurs autres (Pl. III, Phot. 11 et 12) montrent des aciers extrêmement voisins de l'acier eutectique ; nous donnons l'un d'eux à un grossissement beaucoup plus fort, de façon à bien mettre en vue les lamelles alternantes de ferrite et de cémentite (Pl. III, Phot. 11) ; enfin, nous avons attaqué deux aciers hypereutectoïdes au picrate de soude et nous les avons ainsi photographiés ; ici on remarquera la cémentite colorée en noir (Pl. IV, Phot. 15 et 16).

A une teneur en carbone supérieure à 0,900 0/0 de carbone on a de la perlite et de la cémentite ; celle-ci est en quantité d'autant plus grande que le pourcentage de carbone est plus élevé (Pl. III et IV, Phot. 12, 13 et 14 ; Pl. V, Phot. 17 à 20).

A une teneur suffisamment élevée en carbone, cette cémentite prend l'aspect d'un réseau entourant la perlite.

Dans les aciers cémentés, on obtient, lorsque l'opération est poussée assez loin, de la cémentite indépendante qui se présente en aiguilles extrêmement fines, comme le montrent les photographies Pl. VI, Phot. 22 et 23. Si la teneur en carbone de la couche cémentée ne dépasse pas 0,850 0/0, on ne voit que de la perlite compacte (Pl. VI, Phot. 21).

Lorsqu'on examine un acier brut de forge, on peut donc être fixé, tout au moins d'une façon approximative, sur sa teneur en carbone et par conséquent sur les propriétés mécaniques qu'il doit présenter s'il ne contient pas d'impuretés, notamment de soufre, de manganèse et de phosphore en quantités anormales. Cependant, dans cet examen, une hésitation peut se produire pour les aciers qui se trouvent dans le voisinage de l'acier eutectique (c'est-à-dire à 0,900 0/0 de carbone).

En effet, de tels aciers présentent de très grandes quantités de perlite et quelques îlots blancs qui sont de la ferrite ou de la cémentite, suivant que l'acier contient plus ou moins de 0,850 0/0 de carbone. Pour trancher la question, nous avons un moyen absolument certain, c'est l'attaque au picrate de soude ; si les îlots blancs se colorent en noir, nous avons affaire à de la cémentite ; sinon, nous nous trouvons en présence de ferrite.

Sorbite (Album, Pl. III, Phot. 11). — Il arrive souvent

que, quel que soit le grossissement, on ne peut plus voir les deux constituants de la perlite. On lui donne alors le nom de *sorbite*.

La sorbite se colore très rapidement sous l'influence de l'acide picrique. — D'après M. H. Le Chatelier[1], on l'obtient principalement dans les trois conditions suivantes :

1° Trempe à très haute température de fonte aciéreuse aux environs de 2 0/0 de carbone : la sorbite entoure les masses de cémentite (Voir p. 120, *Troosto-Sorbite*).

2° Revenu de la martensite entre 200 et 300° : un échantillon d'acier trempé au milieu des points de transformation et formé par parties égales de troostite et de martensite donne, après attaque de quelques secondes, des taches noires de troostite se détachant sur un fond blanc de martensite.

En faisant revenir le métal à des températures progressivement croissantes, la martensite se colore de plus en plus pendant l'attaque et à un certain moment la coloration est identique à celle de la troostite dont elle ne peut plus être différenciée.

3° Quand on soumet au revenu des aciers trempés à des températures élevées et intégralement transformés en martensite ou même parfois renfermant aussi de l'austenite, le revenu, au lieu de se faire uniformément dans toute l'étendue du métal, se développe en certaines places sous forme de grands cristaux qui présentent dans l'attaque aux réactifs les mêmes caractères que la troostite.

Les photographies des aciers voisins de l'eutectique montrent de la sorbite (Pl. III, Phot. 11).

Martensite (Album, Pl. VI, Phot. 24; Pl. VII, Phot. 27 et 28). — La martensite est le constituant des aciers trempés à l'eau, à une température un peu supérieure à celle de dissociation (ou dissolution) de la cémentite.

Elle est caractérisée par des aiguilles que l'on ne voit qu'à un fort grossissement et après attaque profonde et qui sont dirigées suivant trois directions. Elle est peu colorée par la teinture d'iode et l'acide picrique.

1. *Revue de Métallurgie*, 1904, p. 207; — et *Journal de Chimie physique*, janvier 1904.

Nous verrons ultérieurement que les propriétés de la martensite dépendent essentiellement de sa composition, qui, nous l'avons déjà dit, est variable.

Ce constituant n'est pas coloré par une attaque de cinq secondes à l'acide picrique ; après cinq minutes, on aperçoit les lignes fines déjà indiquées.

Austenite (Album, Pl. VII, Phot. 26 ; Pl. X, Phot. 39 ; Pl. XI, Phot. 41 et 42). — Lorsqu'on exagère toutes les conditions qui doivent augmenter l'effet de la trempe, on obtient de l'austenite.

Il suffit d'employer un acier qui contient plus de 1,10 0/0 de carbone. Il faut, de plus, que la température de trempe soit supérieure à 1.000° et que la température du bain de trempe soit au-dessous de 0°.

Avec les aciers au carbone, on n'obtient jamais de l'austenite pure, mais un mélange austenite-martensite ou, mieux, austenite-troosto-sorbite ; quand on prend des aciers de plus en plus riches en carbone (à partir de 1,10 0/0), on obtient de plus en plus d'austenite. Pour un acier à 1,65 0/0 de carbone, on peut, d'après M. Osmond, obtenir 70 0/0 de ce constituant. Pour un acier plus riche, il y a séparation de cémentite, et la proportion d'austenite n'augmente plus.

L'austenite est un produit possédant une faible dureté minéralogique ; elle se raie à l'aiguille. La teinture d'iode colore en même temps l'austenite et la martensite ; l'acide chlorhydrique et l'acide picrique à 10 0/0 colorent la martensite seule. Dans un acier très carburé, trempé suivant les conditions indiquées par M. Osmond, on voit de la martensite (ou de la troosto-sorbite) affectant la forme de fers de lance et de l'austenite qui se trouve entre ceux-ci.

Troostite (Album, Pl. VII, Phot. 25, 27 et 28). — Si l'on trempe un acier pendant l'intervalle critique, ou bien à température élevée, mais dans un bain moins actif que l'eau, l'huile, par exemple, on obtient de la troostite.

L'attaque pendant cinq secondes à l'acide picrique donne une coloration d'un brun très foncé. La solution à 4 0/0 d'acide

azotique dans l'alcool amylique donne une coloration nette de la troostite après sept minutes; la coloration est très foncée après quinze minutes. Si l'on prolonge l'attaque, on voit des lamelles (Kourbatoff).

Le réactif suivant :

Une partie alcool amylique; une partie alcool éthylique; une partie alcool méthylique ; une partie de solution à 4 0/0 d'acide nitrique dans l'anhydride acétique, donne, après quinze minutes, une coloration très nette de la troostite (et de la troosto-sorbite), tandis qu'aucun autre constituant n'est coloré (Kourbatoff).

Troosto-sorbite. — Dans une étude récente, sur laquelle nous reviendrons (*Revue de Métallurgie*, février 1905), M. Kourbatoff a désigné par troosto-sorbite un constituant obtenu à côté de la martensite et de l'austenite par la trempe à une température élevée d'aciers très riches en carbone et qui présente des caractères se rapprochant assez de la troostite. M. Le Chatelier avait déjà signalé (Voir p. 118) l'existence et le mode de production de ce constituant qu'il avait rapproché de la sorbite.

La solution à 4 0/0 d'acide azotique dans l'alcool amylique donne une coloration brun foncé après cinq minutes (Kourbatoff).

Le réactif suivant :

Une partie alcool amylique; une partie alcool éthylique ; une partie alcool méthylique; une partie de solution à 4 0/0 d'acide nitrique dans l'anhydride acétique, donne, comme pour la troostite, une coloration très nette après quinze minutes, alors qu'aucun autre constituant n'est coloré.

D'ailleurs aucun réactif ne permet de distinguer la troostite et la troosto-sorbite. La seule différence se trouve dans leurs moyens de production et dans la structure générale de l'alliage : tandis que la troosto-sorbite forme des masses irrégulières entourées par un liseré plus noir et que le milieu des taches est toujours plus clair et renferme généralement de la cémentite, la troostite obtenue en trempant pendant la recalescence se développe au milieu de la perlite et non plus autour des grains de cémentite.

De la nature de certains constituants. — Si l'on envisage l'ensemble des constituants des aciers au carbone dont nous venons d'étudier les caractéristiques, on distingue deux catégories très nettes :

L'une, formée par des constituants parfaitement définis, sur lesquels les expériences futures ne doivent rien nous apprendre de nouveau, ferrite, cémentite et perlite ;

L'autre, comprenant les constituants dont la nature n'est pas encore fixée d'une façon absolue, martensite, austenite, troostite et sorbite.

Nous insisterons sur ces derniers constituants.

Comme le faisaient remarquer MM. Osmond et Cartaud dans une note publiée à la suite de leur mémoire sur la cristallographie du fer, dans les *Annales des Mines*, il existe une confusion réelle sur la dénomination de la martensite. Ce terme a tout d'abord été employé pour désigner l'acier trempé ; puis on a regardé la martensite comme étant l'état de l'acier au-dessus du point de transformation A_3 ; mais, de ce fait, on admettait que les formes cristallines prises à haute température se conservaient par trempe.

Or cette martensite obtenue par refroidissement n'est pas homogène, puisqu'elle est magnétique et que, de ce fait, on peut affirmer qu'elle contient du fer α.

Mais alors, comme l'a noté M. Sauveur, si elle n'est pas homogène, on doit pouvoir la résoudre par microscope. Ceci n'a pas encore été fait ; il est vrai, d'ailleurs, que, si les deux éléments sont suffisamment petits, ils ne peuvent pas être différenciés; ce serait notamment ce qui aurait lieu, si on avait affaire à un mélange isomorphe de fer α et de fer β.

La martensite ne représente donc pas la structure définitive du fer au-dessus du point A_3, c'est-à-dire du fer γ ; cette structure est donnée par l'austenite, que l'on ne peut pas produire pure dans les aciers au carbone, mais que l'on trouve ainsi dans les aciers au nickel et au manganèse.

Toutefois, comme le pense M. Osmond, il serait très possible que les formes cristallines de la martensite soient

celles du fer γ; mais elles seraient ici pseudomorphiques.

Dans cette même note, MM. Osmond et Cartaud soulèvent un très intéressant problème ; nous avons dit que, lorsqu'on trempe à 1.100° un acier suffisamment carburé dans de l'eau refroidie à 0°, on obtient le mélange d'austenite et de martensite. Ce mélange existe-t-il à haute température, ou bien se forme-t-il pendant l'opération de la trempe?

Admettre la première hypothèse, c'est dire qu'à 1.100° l'acier n'est pas constitué par une solution homogène. Dans la seconde hypothèse, il y aurait dédoublement d'une partie de l'austenite en martensite pendant le refroidissement. Nous croyons que c'est cette dernière façon de penser qui doit prévaloir; nous en exposerons les raisons au moment où nous étudierons les aciers au nickel.

Que l'austenite soit le fer γ de M. Osmond, nous croyons que tous les métallographes sont d'accord sur ce fait. Mais il reste encore de nombreux points à préciser sur la nature de la martensite.

Il en est de même d'ailleurs de la troostite et de la sorbite, qui semblent bien être des formes intermédiaires entre la perlite et la martensite.

Dans le mémoire que nous avons déjà cité, M. Kourbatoff émet diverses hypothèses qu'il nous paraît intéressant de citer : la sorbite de revenu et la troostite seraient des dissolutions de carbone dans le fer α, et la troosto-sorbite une dissolution de carbone dans le fer γ, qui, pendant le refroidissement, aurait pu se tranformer en fer α pour revenir finalement ainsi à un état chimique semblable à celui de la troostite.

La martensite doit être une dissolution de cémentite dans le fer. En effet, pendant le revenu la martensite ne se transforme pas directement en sorbite, elle commence par rejeter des lamelles de cémentite très étroites autour desquelles se forment les cristaux de sorbite.

« Il est bien difficile de faire des hypothèses, ajoute M. Kourbatoff, relativement à la nature de l'austenite; cela pourrait être une solution de carbone de trempe dans la variété de fer

stable au-dessus de 1.200°. Cela expliquerait la facilité avec laquelle ce constituant se transforme.

« Pendant le revenu, l'austenite, stable seulement aux températures élevées, se transforme facilement en fers de lance ou sorbite de revenu. — La martensite, au contraire, se dédouble en cémentite et cristaux de sorbite. La troostite et la sorbite restent sans aucun changement jusqu'à 300°, tandis que la transformation de la martensite et de l'austenite continue à progresser. A cette température, on n'observe plus que des lamelles de cémentite et des masses noires de sorbite qui remplissent tout l'intervalle. Aux températures plus élevées, le carbone commence à se localiser dans certaines régions qui donneront naissance plus tard à la formation de cristaux de cémentite, en même temps que de la ferrite s'isolera. »

Méthode d'analyse métallographique. — M. Osmond, dans son remarquable mémoire[1], a indiqué la méthode suivante :

1° Faire le polissage-attaque : on obtient alors un constituant coloré : martensite, troostite, sorbite, ou un constituant non coloré : ferrite, cémentite, martensite ou austenite ;

2° Attaque à l'iode : on obtient ou un constituant coloré : sorbite, troostite, martensite, austenite ; ou un constituant non coloré : ferrite et cémentite.

On distingue aisément la ferrite de la cémentite : la première est en cristaux polygonaux, la seconde est en lamelles.

On distingue les quatre premiers constituants les uns des autres au temps qu'ils mettent à s'attaquer et à leur forme. La sorbite se colore très rapidement, la troostite un peu moins vite, la martensite et l'austenite en même temps, mais avec une vitesse bien moindre que les deux autres.

A la méthode de M. Osmond, il faut ajouter maintenant l'emploi de nouveaux réactifs qui facilitent considérablement les recherches.

1° Attaque à l'acide picrique en solution alcoolique à 5 0/0 : la ferrite et la cémentite ne sont pas colorées. Ce réactif diffé-

1. *Contribution à l'étude des Alliages métalliques*, Société d'Encouragement pour l'Industrie nationale.

rencie nettement la perlite et colore énergiquement la sorbite et la troostite (réactif de Igewsky);

2° Attaque au picrate de soude en solution sodique à 25 0/0 de soude caustique et 2 0/0 d'acide picrique à la température de l'ébullition : ce réactif colore nettement la cémentite en noir;

3° Attaque au bitartrate de potassium : ce réactif ne colore pas la cémentite et la perlite. Il colore, mais d'une façon plutôt sale, la ferrite. Ce réactif, ainsi que le précédent, a été indiqué par M. Le Chatelier. Il en est de même des suivants;

4° Attaque par une solution obtenue en mélangeant, à volumes égaux et au moment de s'en servir, une solution de 50 0/0 de soude et une solution de 10 0/0 de nitrate de plomb. La cémentite est colorée très vivement. Ce réactif attaque les phosphures et surtout les siliciures; il doit être employé pour les métaux très carburés.

Il faut tout particulièrement remarquer que les aciers demi-durs, non attaqués par ce réactif quand ils sont purs, montrent, dans le cas contraire, une perlite très accentuée, laquelle doit provenir d'une impureté dans la perlite ordinaire;

5° Attaque par une dissolution à 10 0/0 d'acide chlorhydrique gazeux dans l'alcool absolu additionné de 5 0/0 de chlorure cuivrique pour les aciers recuits et de 1 0/0 seulement pour les aciers trempés; dans ces conditions, la ferrite et la cémentite ne sont pas colorées ; la martensite, très peu ; l'austenite, un peu plus; la troostite et la sorbite, beaucoup.

M. Le Chatelier a, de plus, fait remarquer que les réactifs en solution alcoolique se trouvent en défaut, dans le cas de certains aciers impurs dont ils colorent la ferrite. On ne peut donc plus la différencier suffisamment de la perlite. Toutefois, si on emploie l'alcool absolu, la ferrite est toujours assez blanche pour qu'on la distingue.

A ces réactifs, il faut ajouter ceux que vient d'étudier M. Kourbatoff (*Revue de Métallurgie*, mars 1905). Nous retiendrons les deux principaux :

1° La solution à 4 0/0 d'acide azotique dans l'alcool amylique : ce réactif colore d'abord la troosto-sorbite et la

troostite (cinq à sept minutes), l'austenite est colorée ensuite; après dix minutes, on voit la couleur des lames minces; après vingt-cinq minutes, elle est d'un brun accentué; elle est noire après cinquante-cinq minutes. — La martensite n'est teintée en jaune qu'après une attaque très longue (cinquante-cinq minutes), tandis que la cémentite est toujours blanche;

2° Le réactif formé de :

Une partie alcool amylique; une partie alcool éthylique; une partie alcool méthylique, une partie de solution à 4 0/0 d'acide nitrique dans l'anhydride acétique, ne colore que la troostite et la troosto-sorbite.

Nous venons d'étudier les différents constituants des aciers au carbone, ainsi que la méthode générale d'analyse micrographique de ces produits. Il nous faut voir maintenant les conclusions que l'on peut tirer d'un examen micrographique sur les aciers au carbone.

Conclusions auxquelles peut conduire un examen micrographique d'acier au carbone. — Supposons qu'on nous remette un acier au carbone, que nous le polissions, que nous l'attaquions et que nous l'examinions au microscope. Quelles conclusions pratiques, je dirai même industrielles, pouvons-nous tirer de la microstructure que nous avons sous les yeux?

Premier cas. — Nous sommes en présence de perlite et de ferrite. On peut affirmer que l'acier contient moins de 0,900 carbone, qu'il est brut de forge ou recuit; on peut même, d'après l'abondance de la perlite, préciser le carbone et cela à 0,100 0/0 près et même moins pour les basses teneurs.

On en conclura approximativement les propriétés mécaniques : résistance, limite élastique, allongements et striction, en supposant l'acier pur.

Si l'on est en présence d'un acier extra-doux, la grosseur du grain de ferrite permettra d'avoir une idée sur la fragilité : plus le grain est gros, moins l'acier est résistant au choc. Elle permettra, en outre, de savoir si l'acier a subi un recuit prolongé à haute température, s'il a été surchauffé, brûlé, etc.

Enfin, d'autres phénomènes, tels que la perlite rangée en

bandes parallèles, peuvent donner des indications sur le traitement subi.

DEUXIÈME CAS. — Nous sommes en présence de perlite et de cémentite. La quantité de cémentite permet de préciser le pourcentage de carbone et de voir l'usage auquel peut être destiné l'acier considéré.

TROISIÈME CAS. — Nous sommes en présence de martensite, et avec quelque habitude la texture de la martensite, sa plus ou moins facile coloration par les réactifs ordinaires peuvent donner une idée de sa composition.

Nous avons dit, en effet, que la martensite, bien qu'étant le principal constituant des aciers au carbone bien trempés, n'avait pas de propriétés mécaniques définies, celles-ci étant fonction de sa composition qui est essentiellement variable. C'est ainsi que la martensite est d'autant plus fragile qu'elle contient plus de carbone.

Elle se colore également avec d'autant plus de facilité.

Un acier extra-doux trempé convenablement montre de la martensite ; or sa charge de rupture a bien peu augmenté, ses allongements n'ont pas diminué, de même sa fragilité ne s'est pas accrue, bien au contraire ; il est démontré que la trempe donne de l'homogénéité aux aciers extra-doux, en améliorant considérablement leurs qualités mécaniques.

De la présence de la martensite dans un acier au carbone, on peut conclure que cet acier a été trempé ; mais on ne peut pas déduire ses propriétés mécaniques. Si on a soin de faire recuire une partie de l'échantillon observé en la portant à 900° pendant quelques instants, on trouvera de la perlite qui permettra de connaître approximativement la teneur en carbone de l'acier étudié ; en rapprochant la structure observée de celle trouvée dans le premier cas, on peut préciser davantage les propriétés mécaniques de l'acier à l'état où il se trouvait au début de l'opération.

C'est ainsi que si, après recuit, la métallographie indique une teneur en carbone d'environ 0,800 et si le premier échantillon observé montrait uniquement de la martensite, on peut

conclure à un acier à haute charge de rupture, à faibles allongements et à grande fragilité.

D'ailleurs, il arrive assez souvent que la martensite n'est pas seule, elle est accompagnée souvent de ferrite ou de cémentite.

Dans le cas de la ferrite, on peut d'ores et déjà conclure à un acier hypoeutectique trempé ; dans les cas de la cémentite, à un acier hypereutectique.

La troostite est, avons-nous dit, la caractéristique des aciers ayant subi une trempe douce, notamment la trempe à l'huile. On sera conduit, comme dans le cas de la martensite, à faire un recuit; on pourra prendre des conclusions après examen des deux structures obtenues.

Généralisation. — Le cas le plus général pour les aciers ayant subi un traitement physique (trempe, recuit) ou chimique (cémentation, recuit en présence d'oxydant comme dans la fabrication de la fonte malléable) est plus complexe; on se trouve en présence de plusieurs constituants. Il ne semble pas, d'ailleurs, que la conclusion à tirer soit très difficile, mais les observations sont plus délicates. Il faut, en effet, bien noter les situations respectives des divers constituants. C'est ainsi que l'examen d'une pièce de fort diamètre, trempée vivement à l'eau, conduit généralement à une structure comprenant de la martensite pure sur les bords, de la troostite plus loin, de la sorbite et enfin, au centre, de la perlite; entre chaque constituant on rencontre, bien entendu, les zones de transition.

Dans un acier cémenté non trempé, le centre est à perlite, le bord contient généralement de la cémentite en fines aiguilles.

Dans un acier cémenté trempé, le centre est à perlite si la pièce est suffisamment importante, les bords sont à martensite, et l'on voit nettement que la martensite des bords n'a pas même composition que celle des zones plus éloignées; elle apparaît, en effet, beaucoup plus rapidement sous l'influence des réactifs.

Nous pourrions multiplier le nombre des exemples, mais il nous semble inutile d'insister, ayant bien prouvé quel guide précieux constitue la métallographie autant pour le construc-

teur et le mécanicien qui utilisent quotidiennement les aciers au carbone que pour le métallurgiste qui les prépare.

Nouvelles recherches sur la constitution des aciers. — Dans un remarquable travail, M. Bénédicks établit entre la troostite et la sorbite des distinctions importantes : il croit que, dans la troostite, la liquation de la martensite en deux constituants est déjà commencée; dans la sorbite, la liquation est presque achevée, puisque, dans cette dernière, dit l'auteur, on peut distinguer confusément la structure naissante de la perlite.

Mais le fait le plus important qui se dégage du travail de M. Bénédicks réside dans ce point que, dans les aciers hypoeutectiques à plus de 0,500 0/0 de carbone, les parties claires restant entre les grains de perlite ne seraient pas, comme on l'a cru jusqu'ici, de la ferrite pure, mais une solution de carbone dans le fer à 0,27 0/0 de carbone. Si, en effet, on prend des aciers renfermant de 0,45 à 0,55 0/0 de carbone et que l'on calcule l'aire de la perlite d'après cette teneur en carbone, en supposant que la perlite renferme 0,85 0/0 de carbone, on trouve des résultats différents de ceux donnés par l'observation. Voici les chiffres donnés par M. Bénédicks :

TENEUR EN CARBONE de l'acier	AIRE DE LA PERLITE	
	OBSERVÉE	CALCULÉE
0,45	35 0/0	53 0/0
0,55	45 0/0	65 0/0

D'autre part, l'auteur fait remarquer que : les expériences antérieures de MM. Osmond et Werth ont montré que l'application de la méthode d'Eggertz donnait, pour les aciers chargés en carbone, une perte après trempe qui est précisément de 0,27 0/0.

M. von Juptner a obtenu des résultats semblables, quoique moins concordants. La proportion de carbone de trempe a varié

de 0,14 à 0,32. Enfin M. Ledebur, dans les aciers à 1 0/0 de carbone, a trouvé de 0,16 à 0,36 0/0 de carbone de trempe.

La solubilité du carbone à l'état de graphite conduit à une conclusion semblable. Les aciers ou fontes malléables, décarburés par précipitation de graphite pulvérulent, renferment encore en dissolution une certaine quantité de carbone se rapprochant du chiffre indiqué plus haut. M. Osmond, dans un acier à 1,7 0/0 de carbone, passé au four à cémenter, a trouvé 1,38 0/0 de graphite et 0,24 de carbone combiné. M. Arnold dans un acier à 1,5 de carbone recuit pendant soixante-douze heures, a trouvé 0,33 de carbone combiné. Enfin, M. Howe, en comparant les analyses de fontes grises plus ou moins riches en silicium, a trouvé que la proportion de carbone combiné ne s'annulait que pour la teneur en silicium de 5,5 0/0. Elle va en croissant à mesure que le silicium décroît et l'extrapolation de la limite inférieure des résultats signalés par M. Howe conduit à la teneur de 0,27.

Les recherches de l'auteur sur les propriétés physiques des aciers ont conduit aux résultats suivants, qui s'accordent tous avec l'hypothèse d'une solution de carbone à 0,27 dans les aciers renfermant plus de 0,5 de ce corps au total :

La densité des aciers riches en carbone correspond à des volumes spécifiques inférieurs à celui du fer doux, tandis que la présence de cémentite aurait dû augmenter ce volume. La dureté présente une augmentation brusque aux environs de 0,65 de carbone, qui s'explique tout naturellement si l'on admet la présence de carbone dissous. La résistance à la compression, d'après les expériences de Kirkaldi, croît considérablement lorsque la teneur en carbone augmente de 0,3 à 0,6 0/0. L'accroissement est beaucoup moindre pour les pourcentages suivants.

L'allongement à la rupture donne lieu à une observation semblable. La courbe donnée par M. Howe indique le changement brusque entre 0,5 et 0,6. Enfin les expériences sur la résistance électrique conduisent très nettement à admettre l'existence de la solution à 0,27 0/0 de carbone.

Les expériences métallographiques faites pour déceler une différence entre la ferrite des aciers doux et des aciers demi-durs ne conduisent pas à des résultats très nets. Les légères différences de coloration observées peuvent être attribuées à la présence des impuretés. De très petites variations dans la proportion de silicium changent notablement les résultats de l'attaque; mais dans l'examen micrographique, ce qui donne un argument très puissant en faveur de l'existence de la solution solide de carbone à 0,27, c'est l'insuffisance des aires occupées par la perlite.

Le tableau suivant donne dans la première colonne la proportion de perlite observée et, dans les deux colonnes suivantes, la proportion de perlite calculée en supposant que la ferrite ne contient pas de carbone en dissolution ou en retient 0,27 :

TENEUR en CARBONE	OBSERVÉE au PLANIMÈTRE	SURFACE DE LA PERLITE calculée pour C = 0 dans la ferrite	SURFACE DE LA PERLITE calculée pour C = 0,27 dans la ferrite
0,45	35	53	31
0,35	45	65	48

On voit que l'accord est parfait dans le cas où l'on admet l'existence de 0,27 0/0 de carbone en solution.

Ceci tendrait à prouver que la ferrite existe à un état tel qu'un peu de carbone soit dissous. C'est cet état de la ferrite que M. Bénédicks propose d'appeler la *ferronite*. Mais, comme l'a fort bien fait remarquer M. H. Le Chatelier (***Revue de Métallurgie***, septembre 1904), de nouvelles expériences doivent venir à l'appui de ces premiers faits qui sont, d'ailleurs, extrêmement intéressants.

Fontes (Pl. VIII et IX, Phot. 29 à 36). — La constitution

des fontes est évidemment un problème beaucoup plus compliqué que celui des aciers. Cela provient de ce que les impuretés y sont plus importantes et que, de ce fait, elles peuvent donner naissance à des composés spéciaux, phosphures, siliciures, sulfures, etc.

La question de la constitution des fontes est donc très complexe. Bien que nous revenions sur ce point à propos de l'étude chimique des alliages fer-carbone (Voir p. 147), il nous paraît nécessaire d'indiquer de suite les principaux constituants des fontes.

Ce sont : le graphite, la cémentite, la perlite, des carbures complexes, des siliciures, des sulfures, des phosphures.

Dans les fontes blanches, on trouve de la cémentite, de la perlite et de la martensite.

Le silicium se présente dans les produits métallurgiques sous quatre états différents au moins. Ceci découle des recherches de MM. Moissan, Carnot et Goutal, Lebeau, etc.

Le silicium peut être dissous dans le fer, il peut donner naissance aux combinaisons Fe^2Si, FeSi et $FeSi^2$. Enfin, si le produit contient suffisamment de manganèse, il peut donner naissance à un siliciure double M^3Si, M représentant la somme fer + manganèse.

L'état du soufre dans les produits métallurgiques a fait l'objet d'une étude très approfondie et toute récente de la part de MM. Le Chatelier et Ziégler.

Dans le fer fondu, le soufre donne du sulfure FeS qui forme une enveloppe aux grains cristallins de fer.

Lorsqu'on se trouve en présence du manganèse, il se forme tout d'abord un composé MnS; ceci explique ce fait, bien connu en métallurgie, que le manganèse annule dans une certaine mesure les effets si nuisibles du soufre ; en effet, le sulfure de manganèse fond à une température très élevée et est insoluble.

Bien que MM. Le Chatelier et Ziégler n'aient pas étudié l'état du soufre dans les produits très carburés, ils ont signalé qu'on rencontrait fréquemment dans les fontes de moulages des cris-

taux très réguliers qui se rapprochent du sulfure de manganèse.

D'autre part, MM. Carnot et Goutal ont été conduits à admettre l'existence du composé MnS dans les fontes sulfureuses et manganésifères.

C'est à M. Stead que l'on doit l'étude la plus complète sur l'état du phosphore dans les produits sidérurgiques.

Nous y reviendrons au chapitre v.

Le manganèse, nous l'avons déjà dit, a une tendance à se combiner au soufre et au silicium. S'il est en quantités suffisantes, il peut donner naissance à des carbures doubles qui dérivent tous de la cémentite, dans laquelle une certaine quantité de manganèse s'est substituée au fer.

MM. Carnot et Goutal en ont isolé un certain nombre $Fe^3C,4Mn^3C$; $Fe^3C,2Mn^3C$; $2Fe^3C,Mn^3C$ et $4Fe^3C,Mn^3C$. C'est le dernier que l'on trouverait dans les fontes.

Ce court aperçu sur l'état des impuretés dans les produits sidérurgiques donne une idée de la complexité de l'étude métallographique des fontes, qui, d'ailleurs, n'est pas encore entièrement résolue[1].

Résistance électrique. — M. H. Le Chatelier a montré que pour le fer la transformation de 850° est très nettement accusée par la méthode électrique. Cette transformation existe dans l'acier comme dans le fer doux.

Au contraire, la transformation de 750° et celle de la recalescence se font à peine sentir sur la résistance électrique.

D'autre part, M. Boudouard, dans un important travail présenté à l'Iron and Steel Institute, est arrivé aux principales conclusions suivantes :

1° Les phénomènes de variation de résistance électrique du fer et des aciers en fonction de la température sont réversibles pour les températures extérieures à celles où se produisent les transformations allotropiques. Mais, dans la

1. Voir, au chapitre IV, l'étude détaillée des aciers spéciaux, et au chapitre V divers alliages de fer.

région des points critiques, il y a un écart entre les courbes à l'échauffement et au refroidissement, qui est d'autant plus notable que l'acier est plus carburé;

2° La courbe des variations de résistance des fers et aciers ne change pas de forme parabolique, de la température ordinaire à celle où commencent les transformations; à 800° elle devient linéaire ;

3° Tandis que les transformations A_1 et A_2 ne sont pas très nettement indiquées par des variations dans la résistance électrique, la transformation A_3 est très brusque ;

4° Dans les aciers au carbone, la résistance électrique croît nettement avec la teneur en carbone. L'introduction du chrome et du tungstène augmente la résistance sensiblement dans le rapport de 1 à 2. — Mais cet accroissement ne persiste pas aux températures élevées où les aciers au chrome et au tungstène ont une résistance qui est sensiblement la même que celle des aciers au carbone;

5° Le manganèse, à la température ordinaire, rend la résistance d'un acier au moins trois fois plus grande; le nickel augmente bien plus la résistance électrique que le manganèse. Ces deux métaux donnent un accroissement de la résistance plus faible à chaud qu'à froid.

Des recherches récentes de M. Bénédicks, il semble résulter que des quantités équivalentes de carbone, de silicium et de manganèse font varier de la même façon la conductibilité électrique, à la condition de supposer que, dans les aciers renfermant plus de 0,5 0/0 de carbone, il reste toujours 0,27 0/0 de carbone en solution à l'état de carbone de trempe.

Thermo-électricité. — M. Belloc a fait des déterminations très intéressantes sur la thermo-électricité d'aciers plus ou moins carburés.

Dans une première série d'essais, chaque échantillon a été soumis à deux cycles identiques de température, en partant de la température ordinaire et y revenant après avoir été chauffé à environ 1.100°; les résultats obtenus dans le premier cycle

n'ont pas été retenus, cette opération n'ayant pour but que de donner un recuit définitif aux fils d'acier, dont l'état moléculaire aurait pu être modifié par le travail.

Pour le second cycle, on a fait des observations tant à l'échauffement qu'au refroidissement. Au-delà de 700°, on obtient des chiffres différents dans les deux cas.

Les courbes, tracées en portant sur l'axe des x la température et sur l'axe des y les microvolts, ont toutes la même allure; ce sont des courbes ascendantes présentant trois

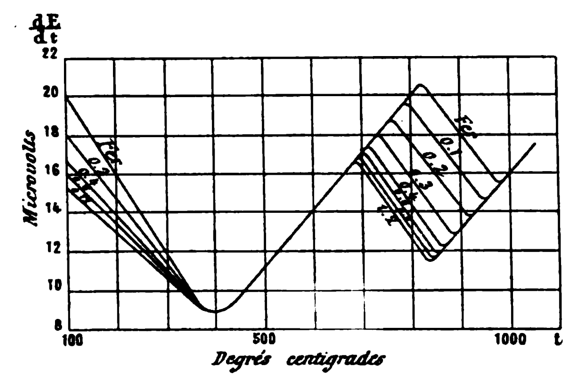


Fig. 46. — Thermo-électricité des aciers (Belloc).

points d'inflexion ; leurs points de départ sont en relation avec la teneur en carbone.

« Par conséquent, dit M. Belloc, quand on passe du fer aux différents types d'aciers, la courbe électromotrice n'est pas altérée, mais simplement déplacée. »

D'autre part, M. Belloc a tracé les courbes $\frac{dE}{dt}$, E étant la force électromotrice, t la température. Ayant établi le tableau des valeurs de E à des températures variant de 40° en 40°, on déduit les valeurs de $\frac{dE}{dt}$ en prenant les différences des deux valeurs successives de E et en divisant par 40; on obtient ainsi la variation de la force électromotrice en microvolts par degré. En traçant ces courbes, M. Belloc est arrivé aux conclusions suivantes :

1° Les courbes sont loin d'être rectilignes. Elles indiquent d'abord un premier minimum vers 380°; puis elles remontent étant sensiblement confondues. A partir d'une certaine température, variable avec la teneur en carbone, elles se détachent les unes des autres, passent par un maximum, descendent isolément jusqu'à un second minimum particulier à chacune d'elles, pour se rencontrer ensuite et se confondre vers 1.080°;

2° La forme générale des courbes est toujours la même et indépendante de la nature et de la provenance des échantillons. Le point de départ de chaque courbe est en relation avec la teneur en carbone;

3° Des observations faites on peut déduire la courbe des aciers idéaux, c'est-à-dire formés seulement de fer et de carbone (*fig.* 46);

4° En résumé, il est hors de doute que les valeurs de $\frac{dE}{dt}$ d'un couple acier-platine peuvent se caractériser par une courbe ayant :

a) Un minimum commun à tous les couples vers 380° correspondant à 8,75 microvolts;

b) Un maximum dont l'abscisse et l'ordonnée sont en relation inverse avec la teneur en carbone, l'abscisse variant de 680° à 820° et l'ordonnée de 16 à 20 microvolts;

c) Un second minimum particulier à chaque courbe, dont l'abscisse est distante du maximum de 120° environ et dont l'ordonnée diffère de ce même maximum de 4 microvolts environ.

La partie intéressante de ces diagrammes réside dans la région située entre 700° et 1.000°. Le rôle du carbone est de détacher les courbes les unes des autres et de les étaler entre un maximum et un minimum suivant la teneur en carbone.

Les déductions que l'on peut tirer de la méthode thermo-électrique appliquée aux aciers sont les suivantes :

Comme la méthode de résistance électrique, la méthode thermo-électrique met en évidence dans le fer un seul des

points critiques, le point a_3. Le maximum de la courbe en $\frac{dE}{dt}$ indique qu'à partir de cette température la variation de cette force électromotrice subit un changement brusque corrélatif d'une modification isomérique qui se produit dans le fer.

Quand du fer on passe aux aciers, on ne change rien à la forme générale des courbes : on ne fait que déplacer la position du maximum.

Magnétisme. — On connaît depuis longtemps les propriétés que possèdent les fers et aciers de s'aimanter; Knight montra que l'acier trempé s'aimante plus que l'acier recuit. En 1873, Jamin prit comme mesure du pouvoir magnétique la force d'arrachement par unité de surface à l'extrémité du barreau. En 1875, Trève et Durassier présentèrent à l'Académie des Sciences deux notes dans lesquelles ils proposaient de classer les aciers par le magnétisme et de remplacer les essais à la traction par la détermination du pouvoir magnétique.

En 1877, M. Ryder, ingénieur aux aciéries d'Otis (Cleveland Ohio), reprit la question et publia, dans le *The Engineering and Mining Journal*, un article intitulé : *Détermination du carbone par le magnétisme*.

Pour établir la comparaison entre les différents aciers, M. Ryder fait séjourner pendant une minute les barreaux prélevés dans ces aciers sur les pôles d'un électro-aimant ; puis il les oppose à un type déterminé placé en regard d'une boussole; le type connu est à une distance fixe de la boussole; l'acier que l'on essaie est placé de l'autre côté de l'aiguille, sur une règle divisée en degrés de carburation.

D'après M. Ryder, les teneurs en carbone sont proportionnelles aux carrés des distances d'équilibre; les aciers de toute dureté et même les fontes blanches obéissent à cette loi.

Ultérieurement, M. Ryder montra que le manganèse avait une influence sur les propriétés magnétiques des aciers, tandis que le phosphore et le silicium n'en semblent pas avoir.

M. Ryder proposa même d'appliquer la méthode magnétique à l'arrêt des opérations du four Martin.

Vers 1881, M. de Waltenhofen créa un appareil pour comparer la puissance magnétique des aciers.

Enfin, M. Osmond reprit la question et publia, en 1885, dans *le Génie civil*, un très intéressant mémoire sur cette question. C'est d'ailleurs à cette étude que nous avons emprunté l'historique précédent. M. Osmond utilise une méthode qui se rapproche de la méthode Ryder. Ces essais ont conduit ce savant aux conclusions suivantes :

Le phosphore et le soufre n'ont pas, du moins dans les limites très étroites où les maintient une bonne fabrication, d'influence sur le magnétisme.

En prenant les teneurs en carbone pour abscisses et les distances lues sur la règle pour ordonnées, M. Osmond a obtenu une courbe qui peut se représenter par l'équation d'une parabole ayant pour axe l'axe des x

$$0{,}000863y^2 = C + 0{,}014,$$

C étant la teneur en carbone.

On a :

$$y = \sqrt{1.159C + 16}.$$

M. Osmond fait remarquer que, la constante de l'équation étant très petite, les résultats obtenus confirment ceux de M. Ryder.

L'influence du manganèse est très nette ; la distance en centimètres d'équilibre magnétique est donnée par l'équation :

$$D = \sqrt{1.159C + 16 + 10Mn},$$

Mn étant la teneur pour 100 de l'acier en manganèse.

Dans une seconde partie de cet important travail, M. Osmond envisage l'influence de la trempe et de l'écrouissage sur la force coercitive.

Les résultats obtenus démontrent à nouveau l'influence de ces traitements, et M. Osmond conclut : « Ces résultats font supposer que toutes ces actions produisent en réalité un seul effet : une modification moléculaire du fer. »

Depuis ces travaux, de nouvelles études de toute première importance ont été faites par Hopkinson, M. Morris et M. Pierre Curie. Ces deux derniers n'ont fait que confirmer les

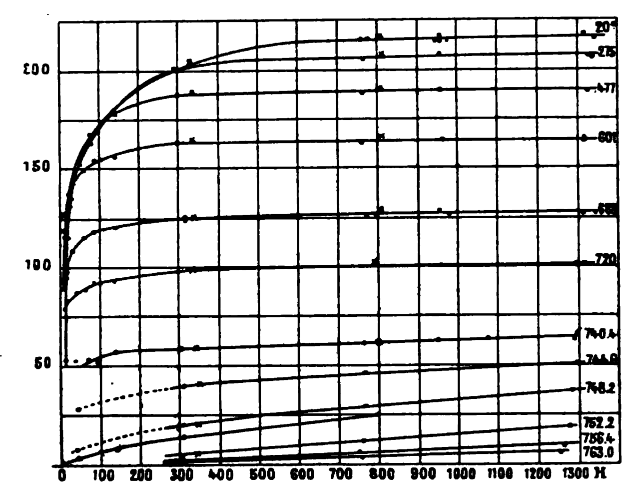


Fig. 47. — Magnétisme des aciers (Curie).

résultats obtenus par Hopkinson. Nous résumerons leurs intéressantes recherches. Celles de M. Pierre Curie sont données dans la figure 47 qui reproduit les courbes d'aimantation du fer doux à différentes températures ; on a porté sur l'axe des x la valeur des H et sur l'axe des y la valeur de I déterminée. On voit que l'on n'a pas dépassé 770°. De plus, on a déterminé les valeurs de l'intensité d'aimantation, le champ magnétisant variant alternativement d'une manière continue de — 1.350 à + 1.350 unités ; mais sur la figure on ne voit que des branches de courbes qui correspondent à la valeur décroissante des H. On voit que, lorsque le champ magnétique croît de 0 à 1.350 unités, les courbes relatives à deux températures diffé-

rentes s'écartent peu l'une de l'autre, sans toutefois se confondre, pendant toute une portion de leur tracé ; puis ces courbes se séparent franchement.

On peut distinguer dans cette courbe trois parties :

1° Une portion initiale qui est peu différente, comme direction, avec la température ;

2° Une portion finale dans laquelle l'intensité d'aimantation est la même, quel que soit le champ ;

3° La portion médiane, qui raccorde les deux autres.

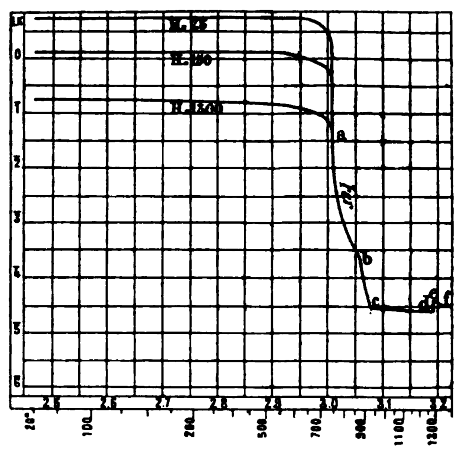


Fig. 48. — Magnétisme des aciers (Curie).

De plus, à partir de 756° et jusqu'à 1.375°, les courbes ne sont plus que des droites passant par l'origine. Cela démontre que le fer possède un coefficient d'aimantation constant pour des températures supérieures à 756°, les champs magnétisants étant compris entre 25 et 1.300 unités, conditions des expériences.

Le fer passe donc progressivement de l'état de corps ferromagnétique à l'état de corps faiblement magnétique, à coefficient d'aimantation constant[1]. On voit sur les courbes que le fer ne se transforme pas à une température déterminée ; on remarque que l'intensité d'aimantation baisse d'abord lentement, puis de plus en plus rapidement lorsque la température s'élève ; la diminution du magnétisme atteint son maximum vers 740° à 750°. Les courbes présentent alors un point d'inflexion.

« L'expression *température de transformation magnétique* du

1. Mémoire de M. P. Curie (*Annales de Chimie et de Physique*, juillet 1895).

fer, fait remarquer M. Curie, qui est d'un usage très commode, a donc une signification un peu vague. Il convient de désigner ainsi la température moyenne des points d'inflexion des courbes. »

A 860°, on note une nouvelle transformation. Celle-ci n'est pas visible sur les courbes données, mais on la voit nettement lorsqu'on construit la courbe log I. Cette courbe (*fig.* 48) présente d'abord un premier point d'inflexion vers 750° à une température voisine du point de transformation et deux autres points d'inflexion à 840° et à 880°.

Enfin, vers 1.280° il se produit une nouvelle transformation qui se traduit par une augmentation brusque de l'aimantation.

Voici, enfin, l'explication que donne M. Curie sous toute réserve : On pourrait, dit-il, admettre que, jusqu'à 860°, le fer se comporte normalement comme tout autre corps ferromagnétique.

Vers 860° le fer commence à se transformer en une deuxième variété allotropique, la transformation est complète vers 920° et le fer reste dans cet état jusqu'à 1.280°; le fer est alors analogue à un corps faiblement magnétique, au palladium, à l'oxygène. Enfin, à 1.280°, le fer revient brusquement à son premier état.

Dans une annotation de son mémoire, M. Curie ajoute : « Je ne me fais pas, d'ailleurs, l'illusion de croire que ces résultats soient suffisants pour résoudre à eux seuls la difficile question de la transformation du fer. »

M. Le Chatelier a remarqué (*Société de Physique*, séance du 20 avril 1894) que la transformation magnétique vers 750° et le changement vers 860° correspondent respectivement aux transformations A_2 et A_3 de M. Osmond et que la transformation de 1.280° correspond à un changement dans les propriétés du fer, qui avait été signalé vers 1.300° par M. Ball, mais dont l'existence avait été contestée.

Les expériences du D[r] Morris ont confirmé ce qu'avait établi M. Curie, que la perméabilité magnétique augmente en champs faibles et décroît en champs forts, lorsque la tempéra-

ture est portée progressivement jusqu'au voisinage de l'abaissement rapide du magnétisme.

Toutefois, le Dr Morris a trouvé que le champ pour lequel la perméabilité reste constante dans cet intervalle est beaucoup plus faible que dans les expériences de M. Curie.

Mais ces recherches démontrèrent l'existence d'un minimum de perméabilité à 550° dans un fer de la composition suivante :

C..................	0,08
S..................	0,003
P..................	0,078
Mn	traces

Ce point semble concorder avec celui signalé par Roberts-Austen. M. Osmond en a donné, d'ailleurs, une explication très plausible dans un long mémoire que nous ne pouvons discuter ici.

Dernièrement M. Bénédicks a montré que l'intensité maximum d'aimantation diminue très rapidement, lorsque la teneur en carbone augmente. Elle est approximativement représentée par la formule suivante :

$$T\ max = 1.000\sqrt{5,23 - (\Sigma C + 0,59)^2} - 710.$$

ΣC représente la somme du carbone de trempe et du manganèse, ce dernier étant exprimé en poids équivalent de carbone.

En extrapolant cette courbe, on trouve que l'intensité d'aimantation s'annule pour C = 1,60 environ.

M. Bénédicks a noté que ce point est justement celui que nous avons indiqué comme correspondant à la teneur en carbone pour laquelle, en l'absence du manganèse et du nickel, le fer conserverait, dans les aciers, la forme γ non magnétique[1].

Dilatation. — En 1869, dans une étude publiée dans les *Proceedings of the Royal Society*, Gore donna les résultats des

1. Voir chapitre suivant, *Aciers au nickel et Aciers au manganèse.*

premières observations faites sur les dilatations des aciers à température élevée. Un fil d'acier était tendu horizontalement; il pouvait être chauffé soit par un courant électrique, soit par une rampe de gaz. Un levier multiplicateur permettait de suivre les variations de dilatation du fil. Il ne remarqua aucune anomalie dans l'échauffement; mais, pendant le refroidissement, il nota vers le rouge sombre une dilatation momentanée.

Barrett reprit avec une plus grande précision les expériences de Gore et publia les résultats en 1873, dans le *Philosophical Magazine*. Ses conclusions extrêmement importantes étaient les suivantes :

1° L'anomalie de dilatation observée par Gore au refroidissement se produit également à l'échauffement ;

2° Ces phénomènes sont inverses l'un de l'autre ; ils se produisent sensiblement à la même température;

3° Ces variations anormales dans les dilatations sont très peu sensibles dans le fer doux; elles sont très accentuées dans l'acier dur;

4° En même temps qu'il se produit une dilatation au refroidissement, on note un dégagement de chaleur. C'est à ce phénomène que Gore donna le nom de *recalescence*.

Un certain nombre de mesures furent faites aux aciéries de Saint-Jacques, à Montluçon, avec l'appareil de M. Evrard. Ces déterminations permirent de préciser différents points :

1° La dilatation qui correspond au phénomène déjà connu ne paraît pas constante pour tous les alliages fer-carbone. Elle est d'autant plus importante que le métal est plus dur, mais elle varie dans des limites très voisines ;

2° La température à laquelle se passe la transformation est d'autant plus basse que le métal est plus carburé.

M. Svédelius, dans l'étude qu'il fit avec son appareil, nota différents phénomènes qui ont aussi leur importance ; il remarqua, en même temps que les variations de dilatation, les variations de température. Il arriva aux principales conclusions suivantes :

1° A l'anomalie de dilatation correspond une anomalie de température ; mais les intensités de ces deux phénomènes ne se correspondent nullement. C'est ainsi que la variation de température est particulièrement accusée dans les aciers très durs, et cela avec une intensité que n'atteint jamais le phénomène de dilatation, tandis que le changement de longueur est plus net avec les aciers de dureté moyenne (cette conclusion n'est pas en concordance avec celles précédemment données) ;

2° La contraction à l'échauffement est bien moindre que l'augmentation au refroidissement ;

3° Dans le fer doux, la transformation aussi bien au refroidissement qu'à l'échauffement semble comprendre deux périodes distinctes ;

4° Dans les aciers doux et dans le fer, la contraction est d'autant plus importante que la teneur en carbone est plus élevée ; elle commence à une température constante, quel que soit le pourcentage en carbone.

Au contraire, l'augmentation au refroidissement commence à une température d'autant plus élevée que la teneur en carbone est plus faible ;

5° La contraction à l'échauffement aussi bien que l'augmentation de volume au refroidissement sont d'autant plus intenses que la teneur en carbone pour les aciers croît de 0,1 à 0,6 0/0. Elles décroissent, au contraire, lorsque le carbone augmente de 0,6 à 1 0/0.

Les importantes recherches de M. H. Le Chatelier apportent une très grande précision dans l'étude de la dilatation des aciers ; les expériences ont eu lieu à vitesse d'échauffement très lente. M. H. Le Chatelier étudia successivement le phénomène de recalescence et les transformations du fer.

1° *Point de recalescence*. — A ce point, il se produit successivement deux changements de dimension de sens inverse.

Ces changements se confondent presque exactement dans l'acier eutectique.

L'existence de ces deux changements de sens contraire s'explique aisément : en effet, dans le phénomène de la recales-

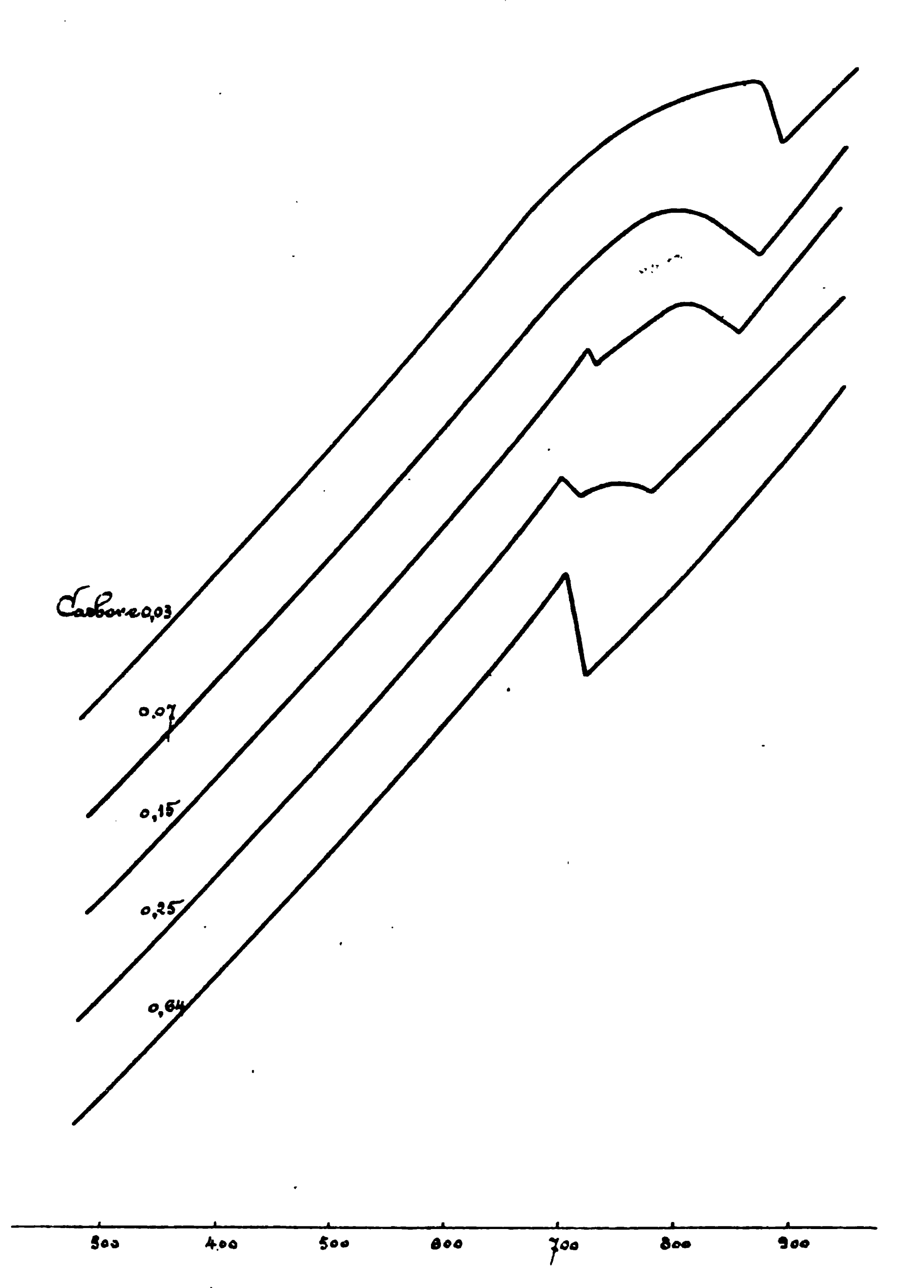


Fig. 49. — Dilatation des alliages fer-carbone (Charpy et Grenet).

cence il n'y a pas seulement, comme on l'a longtemps admis, la transformation de la perlite en martensite, mais il existe deux périodes distinctes : la perlite se transforme tout d'abord en troostite, et ceci se passe avec contraction ; la troostite se change ensuite en martensite, et cela a lieu avec une dilatation qui est sensiblement égale à la contraction qui se produit dans le premier temps.

2° *Transformation magnétique du fer.* — M. H. Le Chatelier n'a pas pu mettre en vue cette transformation par des mesures de dilatation. Ceci est dû certainement à ce que le changement doit être très faible. Le nickel, au contraire, a pu être étudié en détail, et M. H. Le Chatelier a montré que la transformation magnétique se fait d'une façon continue et pendant un intervalle de température assez long, puisqu'il va de 350° à 380°.

3° *Transformation supérieure du fer.* — Ici l'on se trouve en présence d'anomalies extraordinaires, tant au point de vue de la température à laquelle a lieu le changement qu'à celui de la grandeur du phénomène. On ne saurait, à l'heure actuelle, les expliquer. La mesure du phénomène n'est très nette que dans le fer électrolytique pur.

De plus, M. Le Chatelier a montré que les aciers ont, au-dessous des points de transformation, le même coefficient de dilatation, quelle que soit la teneur en carbone et qu'au-dessus de ces points de transformation le coefficient de dilatation est d'autant plus grand que la teneur en carbone est plus élevée.

Enfin, l'étude la plus récente sur la dilatation des aciers à haute température est celle de MM. Charpy et Grenet. Les principales conclusions sont les suivantes :

1° Tous les alliages fer-carbone contenant de 1 à 3,50 0/0 de carbone ont sensiblement le même coefficient de dilatation entre 0 et 700° ;

2° Dans les aciers au carbone, il se produit vers 700° une contraction brusque dont l'amplitude augmente avec la teneur en carbone, atteint un maximum pour la teneur de 0,85 environ et décroît ensuite ;

3° Après la transformation brusque de 700°, il se produit dans les aciers une transformation graduelle qui correspond à une contraction pour les aciers contenant moins de 0,85 0/0 de carbone, à une dilatation pour les aciers à plus de 0,85 de carbone et dont la limite ne peut être fixée avec quelque précision par la méthode dilatométrique que pour les aciers doux;

5° La contraction brusque, qui a lieu à 700°, correspond au point critique A_1 de M. Osmond ; la fin de la transformation graduelle paraît correspondre au point A_3 de la méthode pyrométrique; quant au point A_2, il ne semble correspondre à aucune particularité de la courbe de dilatation (*fig.* 49).

Densité. — M. Bénédicks a déterminé l'influence des différents éléments sur le volume spécifique (c'est-à-dire le volume de 1 gramme) du fer. Il a trouvé les résultats suivants :

ÉLÉMENTS	AUGMENTATION DU VOLUME SPÉCIFIQUE DU FER Par 1 0/0 du corps
Mn	0,00006
Ph	0,00089
Si	0,00117
C	0,0018
Al	0,0025

En corrigeant d'après ces chiffres différents échantillons examinés, M. Bénédicks a trouvé les résultats suivants :

TENEUR EN CARBONE	VOLUMES SPÉCIFIQUES CORRIGÉS
0,08	0,12742
0,45	0,12717
0,55	0,12720
0,90	0,12732
1,20	0,12743
1,35	0,12758
1,50	0,12782
1,70	0,12815

L'auteur déduit de ces résultats que :

1° Le volume du fer pur de 0^{cm^3},1274 ne correspond pas à celui que l'on trouverait en prolongeant la courbe des volumes spécifiques des aciers renfermant de 0,5 à 1,25 0/0 de carbone, qui est seulement de 0,12703 ;

2° Pour les aciers renfermant plus de 2,6 0/0 de carbone, l'accroissement du volume spécifique se fait beaucoup plus rapidement, ce qui fait songer à l'existence possible de deux variétés de cémentite dont la densité serait :

Acier à moins de 1,26 0/0 C..................	7,74
Acier à plus de 1,26 0/0 C..................	7,24

Pour d'autres aciers, M. Bénédicks a trouvé des écarts qu'il ne s'explique pas. M. H. Le Chatelier a fait remarquer (*Revue de Métallurgie*, septembre 1904) que ces différences pourraient être attribuées à la présence de gaz, plus particulièrement de l'hydrogène dissous dans le fer.

Étude chimique. — De nombreuses études ont été faites par voie chimique sur les aciers. Nous ne pouvons que résumer les principales, qui semblent définir les états sous lesquels se trouvent les divers éléments.

On sait que l'on a pu isoler des aciers au carbone recuits ou bruts de forge, un carbure de fer qui paraît bien corres-

pondre à la formule Fe^3C. Le carbure a été, en quelque sorte, soupçonné par Caron, puis isolé par Muller, sir Abel, Osmond et Werth, Arnold et Read, Milius Forster et Schone, et enfin par Moissan.

C'est ce carbure de fer Fe^3C, qui a reçu de M. Howe le nom de cémentite. Différents métallurgistes ont donné au carbone qui se trouve sous cet état divers autres noms : Ledebur l'a appelé carbone du carbure normal; Osmond et Werth, carbone de recuit; et enfin Caron, carbone de cémentation, pour rappeler qu'il se trouve en abondance dans les aciers cémentés.

Si l'on vient à attaquer par des acides étendus des aciers trempés, c'est-à-dire des aciers qui ont été portés à une température assez élevée (aux environs de 800 à 850°) et refroidis brusquement dans l'eau froide, on n'obtient plus de carbure de fer.

Le carbone se trouve sous un état particulier, certainement différent de celui dans lequel il existe dans les aciers recuits ou bruts de forge, et que l'on nomme carbone de trempe. Il paraît être en solution solide dans le fer ou, ce que l'on ne saurait préciser, à l'état de combinaison dissoute dans le fer.

De toute façon il faut admettre que la dissolution du carbone ou du carbure dans le fer est attaquable par les acides étendus.

De plus, dans les fontes, et dans un certain nombre de produits sidérurgiques, on rencontre du graphite, qui est facile à caractériser; il est, en effet, inattaquable aux acides, même concentrés, et il se trouve complètement libre. Ce graphite peut exister à l'état de graphite cristallisé ou de graphite amorphe. Ce dernier, que l'on obtient plus particulièrement dans certains recuits, est souvent dénommé carbone graphitique ou même carbone de recuit. Il ne faut pas le confondre avec le carbone de carbure, qui a reçu la même dénomination de la part de MM. Osmond et Werth. Les confusions ne peuvent guère avoir lieu maintenant, car les noms de cémentite, de perlite et de martensite ont triomphé grâce à la micrographie.

En résumé, l'étude purement chimique des produits sidérurgiques a permis de caractériser les trois états suivants du carbone :

1° Le carbone de carbure formant avec le fer une combinaison définie, la cémentite, Fe^3C, laquelle est attaquée par des acides concentrés, mais est insoluble dans les acides dilués et froids;

2° Le carbone de trempe, lequel est en solution dans le fer soit à l'état libre, soit à l'état de combinaison. Les acides azotique et chlorhydrique le transforment en hydrocarbures gazeux ; l'acide azotique le sépare sous forme d'un dépôt noir, qui, d'ailleurs, se dissout rapidement et colore la liqueur en brun;

3° Le graphite, ou carbone libre, qui est inattaquable aux acides même concentrés, mais qui peut être soit cristallisé, soit amorphe.

Dans le premier cas, on l'appelle plus généralement graphite; dans le second, plus souvent carbone graphitique.

D'autre part, M. Bénédicks a été conduit, par la différence des densités obtenues pour la cémentite, à étudier par des moyens chimiques les carbures de fer que pouvaient renfermer les aciers. L'attaque à l'acide sulfurique très étendu sur deux aciers renfermant 0,98 et 1,63 0/0 de carbone a donné des résidus dont l'analyse a fourni :

Acier à 0,98 0/0 de carbone.....	C = 7,85	H = 0,70
Acier à 1,64 0/0 de carbone.....	C = 10,20	H = 0,28

La teneur théorique correspondant aux deux formules Fe^3C et Fe^2C est :

Fe^3C..............................	C = 6,67 0 0
Fe^2C..............................	C = 9,68 0/0

Si l'on remarque que, dans l'acier à 1,64 0/0 de C, les éléments sont beaucoup plus gros, ainsi que l'avaient montré d'autres essais et que, par suite, la proportion de carbure décomposé par l'acide a dû être moindre, ce que confirme du.

reste la plus faible teneur en hydrogène du résidu, laquelle provient des hydrates de carbone formés par la décomposition du carbure, on est en droit de conclure que, dans les aciers les plus riches en carbure, c'est le composé Fe^2C et non pas la cémentite qui s'en sépare. C'est encore là, fait remarquer la *Revue de Métallurgie*, un fait très important et qui demanderait à être l'objet de nouvelles recherches pour être établi définitivement.

Des vues semblables ont été exprimées récemment par MM. Campbell et Kennedy, en attaquant par les acides des aciers à teneurs variables et analysant les hydrocarbures produits. Ils avaient conclu que le carbure des aciers au-dessus de 1,3 0/0 de carbone n'était pas le même que celui des produits moins carburés, mais sans proposer de changement à la formule du carbure; ils avaient supposé qu'il ne s'agissait là que d'un changement d'état isométrique.

Des recherches faites sur la densité de ces carbures n'ont conduit qu'à des résultats insuffisants. Pour le carbure n° 2, la densité trouvée a été de 3,9, c'est-à-dire moitié de celle à laquelle conduirait la détermination de densité des aciers. Cela tenait, sans doute, à la proportion de carbone mise en liberté par l'action de l'acide.

Enfin des expériences faites sur l'intensité d'aimantation spécifique de ce carbure ont donné une valeur double pour les carbures plus riches en carbone.

D'autres études ont été faites, très nombreuses, d'ailleurs, pour définir les états sous lesquels se trouvent les produits autres que le fer et le carbone dans les produits sidérurgiques; nous résumerons rapidement ce qui touche aux principaux de ces éléments.

Silicium. — Le silicium se trouve sous des états divers; on a pu isoler des ferro-siliciums industriels les trois combinaisons Fe^2Si, FeSi, $FeSi^2$.

Ceci découle des travaux de MM. Carnot et Goutal, Frémy, Hahn, Moissan, Lebeau, etc.

De plus, on a pu isoler des siliciures doubles de fer et de

manganèse, qui correspondent sensiblement à la formule M^3Si, M exprimant la somme fer + manganèse, et un siliciure de manganèse MnSi.

En étudiant les aciers au silicium renfermant de 1 à 30 0/0 de silicium, nous avons bien retrouvé le composé FeSi ; mais nous n'avons pas rencontré le composé Fe^2Si, trouvé dans les ferro-siliciums contenant aux environs de 12 0/0 de silicium ; quelques échantillons ont cependant présenté cette combinaison ; mais en très petites quantités (de 0,5 à 0,7 0/0). Les aciers au silicium ne paraissent donc pas contenir toujours le silicium sous le même état que les ferro-siliciums industriels à même dose de silicium (Voir chap. IV).

Manganèse. — Le manganèse présente une affinité toute spéciale pour le silicium (nous venons de l'indiquer) et pour le soufre ; il peut donc se trouver entièrement à l'état de MnSi ou de MnS.

Quand il est en proportions assez importantes, il forme des carbures doubles plus ou moins complexes ; on en a isolé un grand nombre. Mais ces recherches sont très délicates, et l'analyse chimique conduit souvent à affirmer l'existence d'un produit qui peut très bien ne pas être.

Les produits sidérurgiques à haute teneur en manganèse ne semblent pas contenir le carbure de manganèse Mn^3C découvert, en 1875, par MM. Troost et Hautefeuille. MM. Carnot et Goutal admettent l'existence des carbures doubles suivants : $Fe^3C,4Mn^3C$ pour les alliages renfermant plus de 74 0/0 de manganèse ; $Fe^3C,2Mn^3C$, pour les produits contenant de 60 à 74 0/0 de manganèse ; $2Fe^3C,Mn^3C$, pour ceux renfermant de 30 à 60 0/0 de manganèse ; $4Fe^3C,Mn^3C$ pour les alliages contenant moins de 18 0/0 de manganèse. Behrens avait isolé d'un acier à 0,55 0/0 de carbone et 1,73 0/0 de manganèse une combinaison de formule $Fe^7Mn^2C^3$. Comme le font remarquer MM. Carnot et Goutal, cette formule n'est pas éloignée de celle qu'ils ont été conduits à adopter, soit $4Fe^3C,Mn^3C$.

Phosphore. — M. Stead a publié en 1900, dans l'*Engineering*,

un travail de la plus haute importance sur les états du phosphore dans les produits sidérurgiques. Nous y reviendrons à propos des alliages fer-phosphore.

Disons seulement que, dans les produits sidérurgiques ordinaires, le phosphore est à l'état de phosphure de fer Fe^3P dissous dans le fer.

Soufre. — Le soufre se trouve dans les aciers et fontes à l'état de sulfure de manganèse, MnS. Ceci découle d'importants travaux de MM. Carnot et Goutal et de MM. Le Chatelier et Ziégler. Ces deux derniers savants, dans une étude extrêmement complète (*Bulletin de la Société d'Encouragement*, 30 septembre 1902), ont montré que le sulfure de manganèse fond à une température très élevée et possède une insolubilité remarquable dans le manganèse.

Dans ces conditions, le manganèse entraîne avec lui tout le soufre et l'isole ainsi du métal fondu.

Dureté. — Les expériences faites par M. Bénédicks sur la dureté des aciers au moyen de la méthode de Brinell ont montré que la dureté est sensiblement constante jusqu'à la teneur en C de 0,6 0/0. Les variations étaient comprises entre 130 et 170 (diamètre de la bille = 5 millimètres, pression = 500 kilogrammes). Mais, à partir de 0,6 0/0 de carbone, elles croissaient très rapidement pour atteindre une valeur de 340 pour une teneur en carbone de 1,1 et restaient sensiblement constantes après.

D'ailleurs, les résultats déjà publiés par M. Brinell et par M. Dillner montrent bien une variation rapide de la dureté aux environs des teneurs en carbone de 0,5.

Ceci viendrait à l'appui de l'existence de la *ferronite*.

Comparaison entre les différentes méthodes d'étude des points de transformation des aciers. — Dans une note présentée, le 10 octobre 1904, à l'Académie des Sciences, MM. Charpy et Grenet ont discuté ces méthodes. Voici le texte même de leur note :

« L'étude de la variation des différentes propriétés physiques des aciers, en fonction de la température, permet de constater les transformations que subissent ces métaux et de déterminer les températures auxquelles elles se produisent.

« Dans cet ordre d'idées, trois séries relativement étendues ont été effectuées, dans ces derniers temps, sur les aciers au carbone : M. Boudouard a étudié la résistance électrique ; M. Belloc, la thermo-électricité; MM. Charpy et Grenet, la dilatation.

« L'étude d'une propriété physique nous paraît nettement supérieure à la méthode dite pyrométrique, qui consiste à noter les dégagements ou absorptions de chaleur produits pendant le refroidissement ou l'échauffement d'un métal, parce que le premier procédé permet d'opérer avec des vitesses faibles et même à température stationnaire, et parce qu'il permet de suivre, s'il y a lieu, les différentes phases d'une transformation, au lieu d'indiquer seulement une température critique de part et d'autre de laquelle il se produit une transformation.

« Il nous a paru intéressant de comparer les trois méthodes rappelées plus haut et, pour donner plus de poids à cette comparaison, nous avons repris des mesures de dilatation sur quelques-uns des métaux mêmes qui avaient été employés par M. Belloc et M. Boudouard. M. Belloc a bien voulu nous communiquer ses échantillons; nous avions conservé, d'autre part, des fragments d'aciers préparés pour M. Boudouard. Les tableaux suivants donnent le résultat de cette comparaison; nous l'avons fait porter sur les essais à l'échauffement parce que c'est dans ces conditions que les phénomènes de retard à la transformation ont le moins d'influence et que l'on a le moins à craindre l'influence de l'altération superficielle du métal.

TENEUR EN CARBONE p. 100	MESURES DE RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE TRANSFORMATION		MESURES DE DILATATION CONTRACTION	
	COMMENCEMENT	FIN	COMMENCEMENT	FIN
0,82	730	760	735	745
1,06	730	760	740	750
1,15	739	739	735	740
1,38	750	750	735	755

TENEUR EN CARBONE p. 100	MÉTHODE THERMO-ÉLECTRIQUE		MESURES DE DILATATION CONTRACTION	
	MAXIMUM de $\frac{dE}{dt}$	MINIMUM de $\frac{dE}{dt}$	COMMENCEMENT	FIN
0,28	720	840	720	820
0,62	700	760	743	760
0,92	700	800	737	760
1,14	700	780	747	760
1,30	680	740	725	740

Si l'on examine le résultat de ces tableaux et surtout si l'on se reporte aux courbes publiées dans les divers mémoires cités plus haut, on est amené à conclure que :

« 1° Les résultats fournis par la méthode thermo-électrique et la méthode dilatométrique ne présentent pas de corrélation bien nette, sauf pour l'acier le plus doux;

« 2° Les résultats fournis par la méthode de la résistance électrique et la méthode dilatométrique concordent très sensiblement qualitativement et même quantitativement dans les limites de précision des mesures. »

II. — ÉTUDE INDUSTRIELLE

Il est de toute évidence que le cadre que nous nous sommes assigné ne saurait suffire à une étude même vague de la sidérurgie.

Aussi ne pouvons-nous qu'indiquer le principe des diverses méthodes d'élaboration des aciers.

Nous nous étendrons davantage sur les propriétés mêmes des alliages fer-carbone et leur utilisation.

FABRICATION

Les méthodes de préparation des alliages de fer et de carbone peuvent se diviser en deux classes principales :

Première classe : Méthode permettant l'obtention directe de l'alliage fer-carbone à basse teneur en carbone (aciers) ;

Deuxième classe : Méthodes dans lesquelles on prépare tout d'abord un alliage fer-carbone à teneur relativement élevée en carbone (fontes) pour l'affiner ensuite ou méthode indirecte.

La seule méthode permettant l'obtention directe d'alliages fer-carbone à basse teneur en carbone, consiste essentiellement à traiter directement le minerai par le charbon, de façon à produire l'alliage à une température inférieure à son point de fusion et dans des conditions telles (proportion de charbon, soufflage, etc.) que le fer ne dissolve pas de carbone.

Dans ces conditions, la scorie se forme au détriment de l'oxyde de fer, et il est nécessaire d'employer un minerai très riche.

Cette méthode n'offre actuellement aucun intérêt industriel, malgré de très nombreux essais faits pour la perfectionner.

La méthode indirecte comprend deux phases bien distinctes :

1° La production de la fonte ou alliage riche en carbone ;

2° L'affinage de la fonte.

Cette dernière phase peut se faire par différents procédés que l'on peut ramener à deux classes :

1° Obtention de l'alliage à l'état pâteux :

A. Affinage au bas foyer;

B. Puddlage.

2° Obtention de l'alliage à l'état liquide :

A. Procédé Bessemer : a_1) acide ; a_2) basique ;

B. Procédé Siemens-Martin : b_1) acide ; b_2) basique ;

C. Procédé au creuset ;

D. Procédés électriques.

Nous étudierons rapidement ici les deux phases du procédé indirect.

Première phase : **Obtention d'un alliage riche en carbone, fabrication de la fonte.** — Le principe de la fabrication de la fonte est trop connu pour que nous nous y arrêtions, ne pouvant entrer dans les questions de détail.

Rappelons seulement les réactions qui président à cette fabrication.

Le minerai de fer (nous le supposerons renfermant le fer à l'état d'oxyde Fe^2O^3) est mélangé avec des produits qui ont pour but d'aider la formation du *laitier* et la fusion. Il est introduit en couches alternées avec le combustible dans l'appareil nommé *haut-fourneau*.

Celui-ci a la forme de deux troncs de cône raccordés par leur base : la partie supérieure s'appelle *cuve ;* elle est terminée par le *gueulard*, lequel comprend l'*appareil* de chargement.

Au-dessous de la cuve se trouvent les *étalages ;* puis viennent une partie cylindrique comprenant d'abord l'*ouvrage* et enfin le creuset.

Dans l'ouvrage se trouvent les tuyères, sortes de cône à double enveloppe et à circulation d'eau. Elles reçoivent et

protègent les *busillons*, ajutages qui permettent d'introduire dans l'appareil l'air chaud sous pression nécessaire aux réactions.

L'air chaud soufflé par les tuyères permet au combustible de brûler en amenant la réduction de l'oxyde, suivant les réactions que nous indiquons plus loin.

Dans ces conditions, on obtient un courant ascendant de gaz, un courant descendant de produits solides. L'alliage fer-carbone, qui se forme, se rassemble à la partie inférieure, dans le creuset et s'écoule de temps en temps, ainsi que les silicates fusibles formant les laitiers.

Le courant gazeux montant jusqu'au gueulard du haut-fourneau est capté et utilisé pour chauffer l'air qui arrive par les tuyères dans la région de l'ouvrage, cela par l'intermédiaire d'appareils spéciaux d'échange de température, Cooper ou Withwell.

On admet généralement que le haut-fourneau peut être subdivisé en cinq zones :

1° La zone de préparation et de calcination (gueulard et partie supérieure de la cuve) ;

2° La zone de réduction (partie inférieure de la cuve) ;

3° La zone de carburation (ventre et partie haute des étalages) ;

4° La zone de fusion (bas des étalages et ouvrage) ;

5° La zone de liquation (creuset).

Nous verrons plus loin que cette subdivision est purement théorique.

Les principales réactions du haut-fourneau sont les suivantes :

1° La réduction de l'oxyde de fer peut avoir lieu soit par le combustible solide (carbone), soit par l'oxyde de carbone, gaz réducteur produit par la combustion incomplète du charbon sous l'action de l'air.

Il peut alors se produire les trois réactions représentées par les formules :

$$Fe^2O^3 + 3CO = 2Fe + 3CO^2$$
$$2Fe^2O^3 + 3C = 4Fe + 3CO^2$$
$$Fe^2O^3 + 3C = 2Fe + 3CO.$$

L'action de l'oxyde de carbone sur les différents minerais est variable avec la température et la nature du minerai.

Toutefois elle est des plus importantes vers 400° pour tous les minerais.

De plus, l'action de ce gaz sur l'oxyde Fe^2O^3 n'est pas aussi simple que l'indique la formule ci-dessus indiquée. M. Moissan a montré que l'on avait successivement :

$$3Fe^2O^3 + CO = 2Fe^3O^4 + CO^2$$
$$Fe^3O^4 + CO = 3FeO + CO^2$$
$$FeO + CO = Fe + CO^2$$

2° Mais, d'autre part, l'acide carbonique produit peut réagir sur le fer produit et donner de l'oxyde de carbone :

$$CO^2 + Fe = FeO + CO.$$

Cette réaction est très sensible à 417° ; elle devient importante vers 650° à 700°.

Mais cette action de l'acide carbonique est d'autant moins nette que le courant gazeux considéré renferme plus d'oxyde de carbone.

Il a même été démontré par Debray, d'une part, et sir Lowthian-Bell, d'autre part, qu'un mélange à volumes égaux d'oxyde de carbone et d'acide carbonique réduit Fe^2O^3 à l'état de protoxyde FeO, tandis que le fer réduit est de même amené à l'état de FeO. Il faut donc toujours que l'atmosphère du haut-fourneau soit riche en oxyde de carbone.

3° Au voisinage du gueulard, dans la zone où la température passe de 250 à 800°, l'oxyde de carbone en présence des oxydes de fer ou même de fer réduit se décompose en donnant un dépôt de carbone et d'acide carbonique. On a la réaction :

$$2CO = C + CO^2.$$

Cette réaction a été découverte par sir Lowthian Bell et Gruner. Son importance est très grande, et voici comment s'explique, à ce sujet, Gruner, dans son remarquable traité : *Étude sur le haut-fourneau.*

« Le minerai se fissure dans tous les sens, foisonne beaucoup et se couvre de carbone pulvérulent, sorte de carbone ferrugineux, véritable composé de carbone et de fer, tenant au maximum 5 à 7 0/0 de fer métallique et renfermant toujours aussi une faible dose de fer oxydé en moyenne partie magnétique, dont le rôle semble essentiel à la réaction qui provoque ce dépôt de carbone. L'intensité de cette réaction, qui commence à 200°, atteint son maximum vers 400 à 450° et décroît ensuite rapidement. »

5° L'acide carbonique, qui se produit dans les diverses réactions citées, peut se trouver décomposé par le carbone et donner de l'oxyde de carbone, d'après la réaction :

$$CO^2 + C = 2CO.$$

Cette réaction est très vive à 800°. Elle commence à des températures variables avec la nature du combustible.

En résumé, les principales réactions qui peuvent se passer entre le minerai, le combustible et l'air chaud sont :

α. La réduction de l'oxyde par le carbone et l'oxyde de carbone ;

β. La réduction de l'acide carbonique par le fer et la production d'oxyde de carbone ;

γ. La décomposition de l'oxyde de carbone en présence des oxydes de fer et du fer réduit, en produisant du carbone et de l'acide carbonique ;

δ. L'action du carbone sur l'acide carbonique, laquelle produit l'oxyde de carbone.

Suivons maintenant ce qui se passe à partir du moment où la charge est mise dans le haut-fourneau jusqu'à celui où le fer et le laitier, produits de la charge, s'écoulent au bas du haut-fourneau.

A. Réactions se produisant dans la partie haute du haut-

FOURNEAU. — Dans la zone au-dessous du gueulard, deux faits se produisent :

1° La décomposition de l'oxyde de carbone en carbone et acide carbonique ;

2° Le commencement de la réduction.

La première de ces réactions dégage une quantité de chaleur très importante (3.134 calories par kilogramme de carbone déposé), qui est utilisée à vaporiser l'humidité de la charge et quelquefois à la décomposition des carbonates du *lit de fusion*.

Dans la cuve même, la réduction est d'autant plus importante que les charges descendent et que leur température est plus élevée. Il y a réduction : 1° par l'oxyde de carbone; 2° par le combustible même; 3° par le carbone provenant de la décomposition de l'oxyde de carbone.

D'autre part, il y a décomposition de la castine (CO^3Ca) qui est l'un des composants ordinaires du lit de fusion.

Il se passe évidemment beaucoup d'autres réactions plus ou moins complexes, suivant la température, les charges, la vitesse de circulation des gaz, la nature du combustible. Cependant, parmi ces réactions, il en est plusieurs qu'il est impossible de passer sous silence. Il s'agit de la formation du laitier, d'une part, et de l'absorption du carbone par le fer, d'autre part. Les laitiers, qui sont des mélanges de silicates et de sulfures de chaux, d'alumine, de magnésie, de fer, etc., se forment à une température ordinairement supérieure à celle de fusion. Leurs compositions se modifient constamment dans le haut-fourneau. Leur formation commence lorsque la silice et l'alumine se trouvent en contact avec une quantité de chaux assez importante pour former à la température où le mélange se trouve un composé fusible.

D'un autre côté, le fer, se trouvant en contact avec le charbon à une température assez élevée, en absorbe; il se cémente et, au fur et à mesure que sa teneur en carbone augmente, son point de fusion s'abaisse et descend bientôt à 1.100 ou 1.200°; alors le fer carburé fond, produisant des gouttelettes métalliques au milieu de la masse de laitier,

de chaux et de coke. Enfin il se forme en même temps des réactions secondaires sur lesquelles nous aurons à revenir dans le chapitre v ; nous faisons allusion à l'incorporation d'impuretés, notamment du manganèse, du silicium, du soufre et du phosphore.

On évite le soufre, qui est toujours abondant dans le coke et fréquent dans les minerais et la castine, en employant des dosages basiques; d'ailleurs, le manganèse agit lui-même comme désulfurant.

Le phosphore qui existe à l'état de phosphates divers dans les minerais, se forme par réduction de l'acide phosphorique par le carbure de fer; on évite sa concentration totale dans la fonte par une allure froide et en admettant de l'oxyde de fer FeO dans le laitier.

B. Réactions ayant lieu dans la partie basse du haut-fourneau. — Cette partie constitue ce que l'on nomme justement la zone de combustion. A chaque tuyère, l'air chaud arrivant sur le charbon incandescent produit de l'acide carbonique; celui-ci, se trouvant un peu plus loin en contact avec le combustible, donne de l'oxyde de carbone.

Tandis que se produisent ces réactions, les laitiers continuent à se former, la carburation du fer et la fusion de la fonte s'achèvent.

Les matières s'écoulent ainsi dans le creuset, où elles se séparent par densité; mais la fonte, en passant dans les tuyères, perd par suite d'oxydation une partie du silicium.

Il nous est impossible de ne pas noter que les subdivisions généralement admises dans les réactions d'un haut-fourneau peuvent être très commodes au point de vue didactique, mais sont certainement incorrectes au point de vue industriel. La question des zones doit être laissée au second plan; elle ne peut exister que théoriquement.

Classification des fontes. — Les produits obtenus dans cette première phase du procédé indirect, que l'on nomme *fontes*, sont classés en :

1° *Fontes de moulage;*

2° *Fontes d'affinage.*

Les *fontes de moulage* renferment 3 à 4 0/0 de carbone dont 0,3 à 0,7 0/0 de graphite; de 0,7 à 3,5 0/0 de silicium; moins de 1,5 0/0 de manganèse; environ 0,5 0/0 de phosphore.

On donne en général à ces fontes des numéros variant de 1 à 5 suivant le grain, la plus graphiteuse étant le numéro 1;

Les numéros 1 et 2 ne sont employés qu'en mélange;

Les numéros 3 sont moulés directement;

Les numéros 4 et 5 ont des grains très serrés et prennent la trempe superficielle.

Les *fontes d'affinage* sont celles destinées à la fabrication de l'acier.

On distingue : 1° les fontes de puddlage. Leur composition est très variable. Elles peuvent contenir 4,5 0/0 de carbone (pour l'affinage au bas foyer). Tantôt ce sont des fontes grises renfermant 2 à 1 0/0 de silicium, tantôt des fontes truitées (Si 0/0 $<$ 1), tantôt enfin des fontes blanches où il n'y a pas de graphite et dont la teneur en carbone total est inférieure à 3 0/0.

Ces fontes ne doivent contenir que très peu de phosphore et de soufre.

2° Les fontes Martin, qui doivent être manganésées et un peu siliceuses; elles ne doivent pas renfermer de soufre. Elles peuvent être phosphoreuses dans le cas du Martin basique.

3° La fonte Bessemer acide, qui renferme 2 ou 3 0/0 de silicium, des quantités notables de manganèse, 2 à 6 0/0, et ne doit contenir ni soufre ni phosphore;

4° La fonte Bessemer basique ou Thomas qui renferme beaucoup de phosphore (2 à 2,75), peu de silicium (5,5) et une quantité notable de manganèse (1,50 à 1,75).

DEUXIÈME PHASE : **Affinage de la fonte.** — Comme nous l'avons dit, les procédés employés pour l'affinage de la fonte peuvent être groupés en deux classes :

1° Obtention de l'alliage à l'état pâteux;

2° Obtention de l'alliage à l'état liquide.

1° Obtention de l'alliage a l'état pateux. — Elle peut se faire :

A. Au bas foyer;

B. Par puddlage.

L'*affinage au bas foyer* tend à disparaître, excepté dans quelques régions spéciales. Il comprend généralement deux parties :

Le *mazéage* ou *finage*, qui est une période d'oxydation du silicium transformant la fonte grise en fonte blanche. L'*affinage*, qui a pour but la décarburation et la purification totale de la fonte blanche précédemment obtenue.

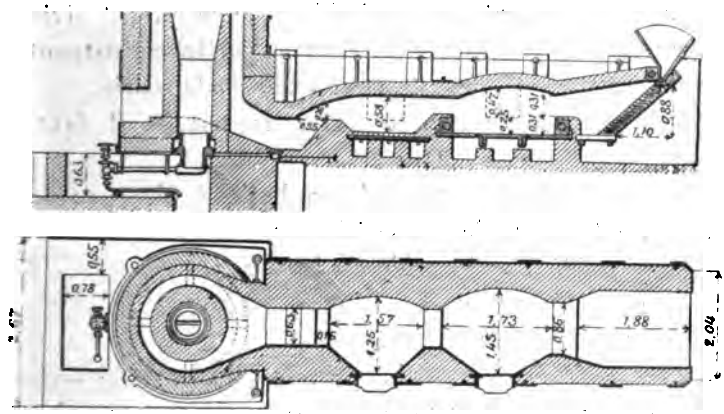


Fig. 50 et 51. — Four à puddler (Coupe et plan).

Le *puddlage* est basé sur les réactions suivantes :

La fonte est introduite sous forme de blocs dans le four à puddler en même temps que les battitures et les scories riches en oxyde.

Le four à puddler n'est pas autre chose qu'un four à réverbère dont la sole est en fonte recouverte d'oxyde de fer et refroidie souvent par un courant d'air ou d'eau[1].

Le chargement effectué, on pousse le feu de façon à faire fondre la matière.

1. A noter l'existence d'un four Bouvard utilisé au Creusot; il effectue un brasage mécanique et comporte dans la sole même un couteau qui aide à la formation de la loupe.

On note deux périodes distinctes :

La période de scorification pendant laquelle la fonte s'affine cédant le silicium, le manganèse et le phosphore qu'elle contient à la scorie sous forme de silice, d'oxyde de manganèse et d'acide phosphorique ; la scorie qui nage devient plus fluide.

La période de décarburation pendant laquelle le carbone brûle en donnant de l'oxyde de carbone et de l'acide carbonique. Le bain bouillonne et des bulles de gaz se produisent : le carbone disparaissant, le métal devient de moins en moins fusible.

Le fer se fige bientôt en morceaux pâteux qui se soudent entre eux et forment une véritable éponge qui est divisée en plusieurs parties par l'ouvrier, chaque partie constituant une *loupe* que l'on *cingle* ensuite pour expulser la scorie.

2° Obtention du métal a l'état liquide. — Il faut distinguer ;

A. Le procédé Bessemer acide ou basique (dans ce dernier cas, il prend le nom de procédé Thomas) ;

B. Le procédé Martin acide ou basique ;

C. Le procédé au creuset ;

D. Les procédés électriques.

A. *Procédé Bessemer*. — Le principe du procédé Bessemer réside essentiellement dans la combustion intermoléculaire du carbone, du silicium, du phosphore, du manganèse, etc., ainsi qu'il a été indiqué, le 2 février 1856, par sir Henry Bessemer, à la *British Association*, sous le titre de *Fabrication du fer et de l'acier sans combustible*.

L'appareil utilisé dans le procédé Bessemer est une cornue (ou convertisseur), dont l'enveloppe formée de plaques métalliques est garnie intérieurement d'un revêtement réfractaire. Cette cornue, soutenue par une frette, peut tourner dans deux paliers ; l'un des tourillons, qui est creux, permet d'amener l'air provenant d'une machine soufflante dans la *boîte à vent*, qui forme le fond de la cornue.

Le second tourillon porte un pignon qui, par l'intermédiaire d'une crémaillère, peut faire tourner la cornue.

Les réactions du Bessemer varient avec les deux sortes de procédés :

a_1) *Procédé acide*. — La charge de fonte est introduite à l'état liquide (venant du haut-fourneau, du mélangeur ou du cubilot) dans la cornue inclinée et préalablement chauffée.

On redresse la cornue et l'on donne le vent (on évite ainsi la rentrée de la fonte dans les tuyères de la boîte à vent).

Les réactions commencent immédiatement. On distingue les trois périodes de la scorification ou des étincelles, de la carburation ou des flammes, et des fumées.

Dans la période des étincelles — ainsi nommée parce qu'on note de nombreuses étincelles dues à l'entraîne-

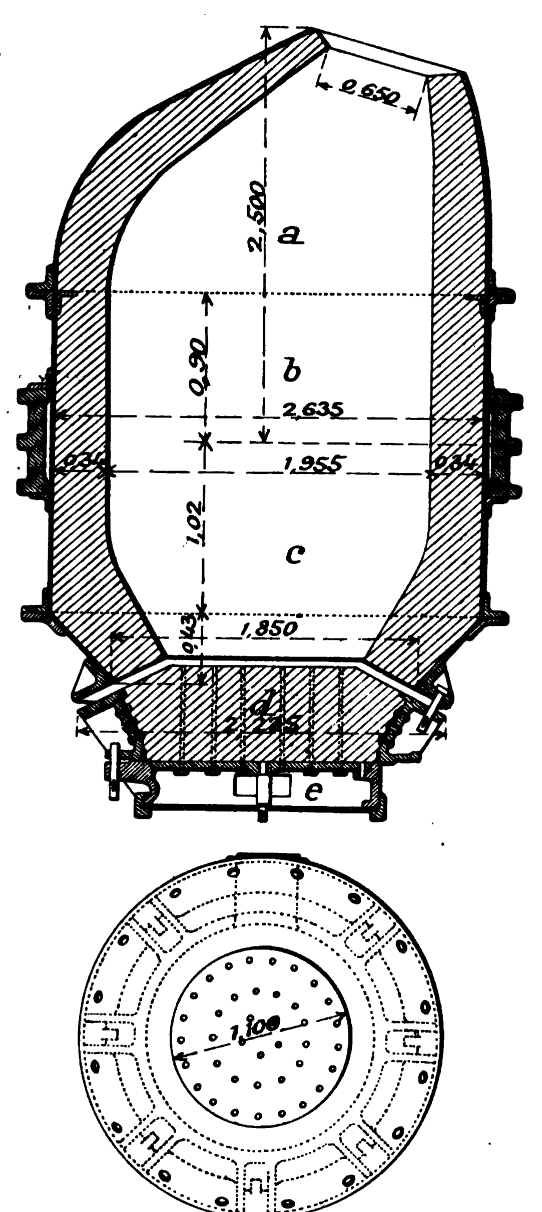


Fig. 52 et 53. — Cornue Bessemer (Procédé Thomas).

ment de globules de métaux et scories par le vent — le silicium brûle d'abord en donnant de la silice; d'où un dégagement de chaleur considérable. Le manganèse brûle peu. Quant au carbone, il ne brûle pas du tout.

Dans la période de décarburation ou des flammes, le manganèse finit de brûler et le carbone brûle en donnant une flamme longue et qui, jaune orange au début, devient blanche.

La période des fumées indique la combustion du fer; elle est caractérisée par le départ d'une fumée d'abord blanche, puis rouge. On arrête alors l'opération. A ce moment on a encore à opérer la désoxydation et la recarburation du bain. (On est, en effet, en présence de fer sans carbone ayant dissous de l'oxyde de fer.) Cette opération, étant commune aux procédés Bessemer et Martin, sera décrite plus loin.

a_2) *Procédé basique ou procédé Thomas.* — Ce procédé a rendu possible l'affinage des fontes phosphoreuses; il est dû à MM. Thomas et Gilchrist, qui publièrent leur théorie en septembre-octobre 1878.

Le principe du procédé consiste à oxyder le phosphore de la fonte en le transformant en acide phosphorique, et cela en présence d'un revêtement basique et d'addition de chaux.

D'ailleurs ces conditions de la déphosphoration avaient déjà été indiquées par L. Gruner (*Traité de Métallurgie*, 1875).

Les fontes, qui sont employées, doivent contenir un minimum de silicium, sans quoi il y aurait formation de laitiers acides s'opposant à la déphosphoration. On distingue dans une opération Thomas les phases suivantes : La période des étincelles, la période de décarburation, la période de sursoufflage, la période de combustion du soufre.

La fonte liquide versée dans le convertisseur est additionnée de chaux. Au moment où l'on redresse la cornue et où l'on commence à souffler l'air, on aperçoit des étincelles provenant de la combustion du silicium et du manganèse; mais cette période dure peu, les teneurs en silicium et manganèse étant faibles. La chaux donnera avec la silice du bain des scories.

Le phosphore et le carbone brûlent ensuite. Il se forme de

l'acide phosphorique ; mais, comme, en même temps, l'oxyde de carbone prend naissance, une partie de l'acide phosphorique non encore uni à la chaux est réduite. Aussi le phosphore ne peut-il être complètement éliminé avant que la décarburation ne soit complète.

On a donc ici une période de décarburation qui est suivie de celle de déphosphoration proprement dite ou de sursoufflage ; le phosphore brûle, donne de l'acide phosphorique qui s'unit à la chaux pour donner en majeure partie du phosphate tétrabasique de chaux.

Le phosphore étant éliminé, le soufre brûle ; mais en même temps une partie du fer est oxydée. On rend cette période aussi courte que possible.

B. *Procédé Martin.* — Le procédé Martin peut être utilisé de deux façons :

b_1) Procédé Martin acide ;

b_2) Procédé Martin basique.

Mais, dans chaque procédé, on peut utiliser l'un des trois modes d'opération suivants :

1° Le procédé dit de dilution ou *scraps process ;*

2° Le procédé au minerai ou *ore process ;*

3° Le procédé dit des *loupes*.

Le four Martin se compose de deux parties :

L'appareil de chauffage, gazogène, chambres de récupération, etc. ;

Le four proprement dit.

Pour la description détaillée, nous renverrons aux traités spéciaux. Nous dirons seulement que le four n'est pas autre chose qu'un réverbère dont la sole est formée de plaques de fonte sur lesquelles on vient disposer un revêtement réfractaire variable avec la marche (on emploiera un revêtement basique dans le cas de marche en procédé basique ; un revêtement acide dans l'autre cas) et dont la voûte est toujours en briques siliceuses.

Donnons de suite les caractéristiques des trois méthodes qui peuvent être utilisées, que l'on soit en marche basique ou en marche acide.

Dans la marche au scraps process, on *dilue* le carbone de la fonte dans des riblons de fer ou d'acier à faible teneur en carbone.

On utilise généralement 1/3 fonte et 2/3 riblons.

Dans la marche au minerai (*ores process*), on recouvre le bain, qui peut être de la fonte ou un mélange fonte et riblons, par du minerai qui produit la décarburation.

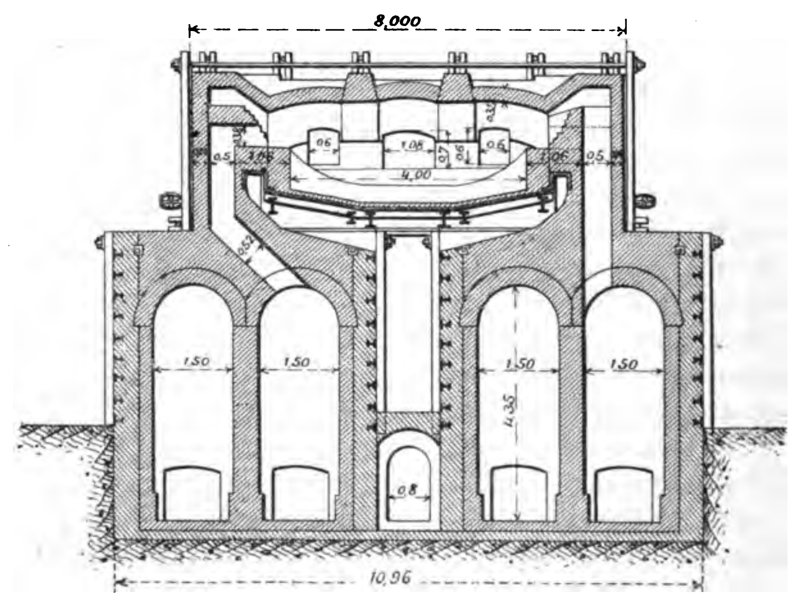


Fig. 54. — Four Siemens-Martin.

Enfin, dans la méthode dite des loupes, on remplace les riblons par des loupes fournies par un procédé direct.

Examinons rapidement maintenant ce qu'est le procédé acide et ce qu'est le procédé basique.

Dans le procédé acide, le carbone se diffuse dans tout le bain sous la haute température du four, le silicium s'oxyde sous l'influence de l'atmosphère du four, maintenue oxydante, et des oxydes des riblons, et il y a formation de scories, auxquelles viennent s'ajouter les oxydes de manganèse.

Enfin, le carbone, qui est peu brûlé par l'oxygène de l'atmosphère du four, peut être diminué par la présence du minerai.

Dans le procédé basique, on utilise des fontes phosphoreuses. Mais il ne sera pas utile d'avoir des fontes très phosphoreuses, puisqu'il n'est pas question ici de combustion intermoléculaire. On enlève l'acide phosphoriqne, produit par oxydation, par la chaux. Toutefois on sait pratiquement que l'on ne peut enlever les dernières traces de phosphore que lorsque le bain ne renferme que 0,1 0/0 de carbone environ.

Des additions finales. — Que l'on ait affaire au procédé Martin ou au procédé Bessemer, il faut faire une addition finale. Cette addition finale a pour but, dans le procédé Martin, d'amener exactement le métal au degré de carburation voulu ; dans le procédé Bessemer, de désoxyder le métal en même temps que de le recarburer.

On utilise presque toujours à cet effet un des alliages de fer et de manganèse que nous décrirons dans le chapitre v. L'addition se fait dans l'appareil même, quelquefois dans la poche de coulée.

On a cherché, de nombreux côtés, à recarburer le métal par le carbone, sous forme de coke ou d'anthracite. On a utilisé le coke jeté à la pelletée dans la poche de coulée, des briquettes de coke agglomérées par du lait de chaux que l'on jetait aussi pendant la coulée ou même dont l'on parait la poche de coulée. Darby a proposé un entonnoir de forme spéciale sur le fond duquel est placé du charbon ; le métal, y passant, dissout le carbone.

On s'est buté dans les premiers cas à la combustion du coke, à la non-homogénéité du métal et au gros ennui connu sous le nom de *fond de poche* et provenant de ce que le métal est trop vite refroidi et ne peut couler. Le procédé Darby a eu dans quelques aciéries plus de succès, sans cependant paraître donner la solution définitive de cet important problème.

Procédés similaires. — Nous ne citerons que pour mémoire

quelques procédés qui ne sont que des modifications du procédé Martin[1].

A. Le *procédé Bertrand-Thiel*, employé dans les usines de Kladno (Bohême), consiste essentiellement à traiter, dans un premier four Martin, de la fonte riche en phosphore et silicium par l'*ore process*, et de couler le produit ainsi obtenu dans un second four, dans lequel on a fondu des riblons. Ceux-ci, étant un peu oxydés, agissent non seulement par dilution, mais aussi par oxydation.

B. Le *procédé Duplex* consiste dans le traitement au convertisseur acide d'une fonte siliceuse; après la perte de silicium, la fonte est déphosphorée et décarburée dans un four Martin.

C. Le *four Talbot* est un grand four basculant qui permet de ne retirer que le quart de la charge à des intervalles rapprochés. La partie de la charge qui reste constamment dans le four forme volant de chaleur et permet à la matière introduite d'être portée rapidement à la température désirée. Un appareil Talbot est en construction en France dans les usines de Senelle-Maubeuge. Plusieurs de ces appareils fonctionnent régulièrement en Angleterre et en Amérique.

C. *Procédé au creuset.* — Le principe sur lequel repose le procédé au creuset est extrêmement simple; c'est, en quelque sorte, celui de la synthèse : on fond ensemble toutes les matières nécessaires pour produire l'acier voulu : fer, fer cémenté, (ou fontes), additions spéciales (ferro-chrome, ferro-tungstène, etc.), de façon à arriver aussi exactement que possible aux teneurs désirées dans les différents éléments.

Les creusets employés contiennent de 12 à 60 kilogrammes d'acier et sont formés d'argile renfermant généralement du graphite.

Ces fours sont chauffés au gaz avec récupérateurs, au pétrole ou même au coke; on a construit dans ces dernières années des fours soufflés au coke qui permettent d'obtenir rapidement

1. Voir, pour plus amples renseignements, la communication faite au Congrès de métallurgie de Liège (juin 1905), par M. Acker.

l'acier fondu [1]. Ces appareils tendent beaucoup à se vulgariser. Le procédé dit au creuset est celui qui permet la préparation des aciers à outils ordinaires et spéciaux.

D. *Procédés électriques.* — Durant ces dernières années, on a beaucoup parlé de l'*acier électrique;* aussi tenons-nous à insister sur ces procédés de fabrication.

Nous avons indiqué, à propos des fours électriques, quels étaient les principes de la fabrication.

Au point de vue acier, il faut distinguer le four (tel celui de M. Girod) qui n'a pour but que de fondre les matières et de se substituer aux fours à creuset, et celui dans lequel on fait l'affinage, comme le four de la Praz.

Nous donnerons sur ce dernier point quelques détails qui sont empruntés à la très intéressante conférence qu'a faite M. Combes à la Société d'Encouragement pour l'Industrie nationale (9 décembre 1904 ; *Revue de Métallurgie*, janvier 1905).

Dans ce four de la Praz, on charge la fonte liquide ou solide ou des riblons.

Après la fusion, on évacue le premier laitier et par addition de minerai on forme un laitier oxydant, qui opère la décarburation du métal.

L'oxydation terminée, le laitier est de nouveau évacué et remplacé par un laitier artificiel autant de fois qu'il est nécessaire pour atteindre l'épuration complète. Pour enlever le soufre et le phosphore, on opère comme suit : on commence par écouler le premier laitier de fusion et on le remplace successivement par deux laitiers artificiels de composition convenable, lesquels sont évacués quand on les a laissés suffisamment en contact avec le bain. En somme, le travail effectué à la Praz a de nombreuses analogies avec l'*ore process*. Cependant ici on fait intervenir différents laitiers. Quant à la recarburation, elle est obtenue au moyen d'un aggloméré de fer et de charbon, qui est assez dense pour traverser la couche de laitier et venir en contact avec le bain métallique, dans lequel

2. Voir, au chapitre II, la description du four Leifert-Bosshardt.

il se dissout rapidement, grâce à la chaleur de l'arc électrique.

En terminant, disons qu'à l'usine de la Praz on a fait des coulées de 7 tonnes d'acier et que la dépense d'énergie par tonne serait de :

6f,40- 8f,00	avec la force hydraulique, le kilowatt-heure coûtant		0,008-0,010
40 ,00-48 ,00	avec des machines à triple expansion,	—	0,05-0,06
25 ,00-32 ,00	avec des gazogènes et moteurs à gaz,	—	0,03-0,04
16 ,00	environ avec le gaz de haut-fourneau,	—	0,02 env.

PROPRIÉTÉS ET UTILISATIONS DES ALLIAGES FER-CARBONE

Classification des alliages fer-carbone. — De grandes difficultés se sont élevées dans l'étude des propriétés des alliages de fer et de carbone provenant de ce que ces alliages ne peuvent être préparés à l'état pur.

Nous donnerons tout d'abord la classification des alliages fer-carbone; nous étudierons ensuite leurs propriétés.

On distingue trois classes :

1° Les fers, produits obtenus à l'état pâteux;

2° Les aciers, produits obtenus à l'état liquide;

3° Les fontes.

Le commerce distingue six espèces de fer :

Fer n° 2, ou fer commun de construction[1].

Il donne :

R	32 à 34
A 0 0	6 à 9

Fer n° 3, utilisé pour la fabrication des chaînes, la ferronnerie : qualité commune de la Marine, catégorie 4 des Compagnies de chemins de fer.

Il donne :

R	34 à 37
A 0 0	9 à 12

Fer n° 4 : qualité ordinaire de la Marine, véritable fer de maréchalerie, 3e catégorie des Compagnies de chemins de fer.

1. Le fer n° 1 n'existe pas.

Il donne :

R..........................	37 à 38
A 0/0......................	12 à 15

Fer n° 5 : fer de forge, qualité supérieure de la Marine, 2e catégorie des Compagnies de chemins de fer.

Il donne :

R..........................	38 à 39
A 0/0......................	15 à 20

Fer n° 6 : il est nerveux ou à grains, 1re catégorie des Compagnies de chemin de fer.

Il donne :

R..........................	38 à 40

quand il est à grains ;

R..........................	36 à 38

quand il est nerveux.

On a :

A 0/0......................	20 à 25

Les aciéries distinguent six classes d'acier qui varient un peu suivant les usines. Ce sont avec leurs emplois :

1° Les *aciers extra-doux*, qui donnent :

R..........................	32 à 38 kilogrammes
E..........................	20 à 24
A 0/0......................	34 à 28 environ

Teneur en carbone : 0,050 à 0,150.

Applications : pièces pour cémentation, pièces de forge, rivets, boulons, éclisses, pointes, clous, tôles de dynamos, tôles et tubes de chaudière.

Remplace le fer de Suède et le fer puddlé dans un grand nombre de leurs applications.

2° Les *aciers doux* : ils donnent :

R.................	38 à 46
E.................	24 à 28
A 0/0.............	28 à 25

Teneur en carbone : 0,150 à 0,250.

Applications : acier de construction, profilés, fers à planchers, tôles, etc.; aciers pour navires, pour ponts, rivets, boulons, tire-fonds, etc.

3° Les *aciers demi-doux :* ils donnent :

R..................	46 à 55
E..................	28 à 32
A 0/0..............	25 à 22

Teneur en carbone : 0,250 à 0,400.

Applications : pièces de forge, pièces de machines (arbres, tiges de pistons), essieux de voitures, de locomotives, etc., petits rails, pièces d'acier moulé.

4° Les *aciers demi-durs :* ils donnent :

R..................	55 à 65
E..................	32 à 38
A 0/0..............	22 à 18

Teneur en carbone : 0,400 à 0,600.

Applications : moulages, essieux, arbres de transmission, tiges de pistons, glissières, socs de charrue, barres à mine, coutellerie ordinaire, pièces d'armes, ancien acier à canon[1].

5° Les *aciers durs :* ils donnent :

R..................	65 à 75
E..................	38 à 45
A 0/0..............	18 à 14

Teneur en carbone : 0,600 à 0,700.

Applications : moulages [2], ressorts, rails, fils pour câbles, pièces d'armes, lames de papeteries, coins de carrier, masses

1. L'acier actuellement employé pour les canons est un acier au nickel dont nous parlons au chapitre suivant.

2. Pour les moulages d'acier, dont on trouvera plus loin un cahier des charges, on se sert d'aciers renfermant d'importantes quantités de silicium. Généralement on emploie des aciers à 0,600 0/0 C; 0,250 à 0,400 0/0 Si, et 0,550 à 0,700 Mn. Il doit être cependant bien entendu que l'on utilise fréquemment, pour les moulages, des aciers extra-doux.

et massettes, coutellerie, marteaux, matrices, ressorts, bandages à grande résistance, barres à mines pour pierres tendres, éclisses, socs et versoirs, faucilles, outils divers, limes, etc.

6° Les *aciers très durs* : ils donnent :

R..................	75 à 85
E..................	45 à 50
A 0 0..............	14 à 8

Teneur en carbone : 0,700 à 0,800.

Applications : outils, ressorts de très grande résistance, limes, scies, boulets pour broyeurs croisements de voies, pointes de cœur, fraises, coutellerie fine.

7° Les *aciers extra-durs* : ils donnent :

R................	85 à 100
E................	50 à 55
A 0 0............	5 à 8

Teneur en carbone : supérieure à 0,800.

Applications : outils, broches de filatures, obus de rupture, cylindres de laminoirs, fils à câble de grande résistance, fleurets de mineurs.

Propriétés mécaniques des alliages fer-carbone. — Disons quelques mots des relations qui existent entre la composition chimique d'un acier et ses propriétés mécaniques. Ces relations découlent principalement de trois séries d'expériences qui ont été faites en vue de l'Exposition de 1878. Elles sont dues :

1° A la Compagnie de Terre-Noire (mémoire de M. Deshayes, *Annales des Mines*, 1879) ;

2° Au professeur Bauschinger de Munich ;

3° Au Jernkontoret ou Comptoir des forges de Suède.

Si l'on considère des aciers recuits, c'est-à-dire dans lesquels on a complètement détruit l'effet de l'écrouissage, on observe que la charge de rupture et la limite classique croissent avec

la teneur en carbone, tandis que les allongements pour 100 et les strictions diminuent.

De plus, la limite élastique est sensiblement égale à la moitié de la résistance à la rupture :

$$E = \frac{R}{2}.$$

Les résultats obtenus par M. Deshayes sont résumés dans le

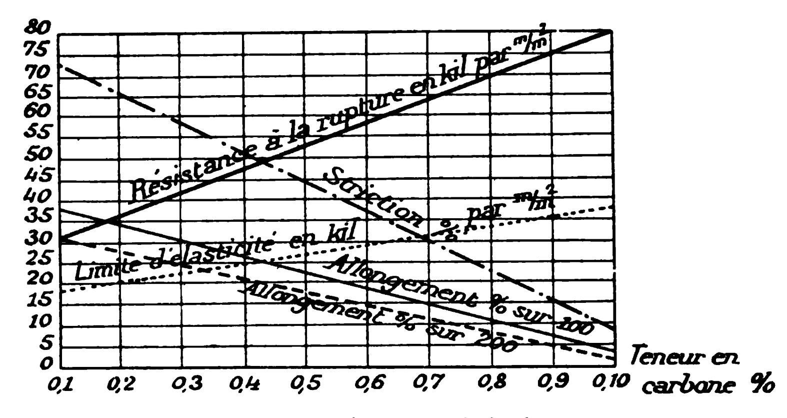


Fig. 55. — Diagramme de Deshayes.

diagramme ci-contre (*fig.* 55) qui, il faut bien le noter, n'a trait qu'à des aciers théoriquement purs.

D'autre part, M. Deshayes a cherché à traduire les résultats par une formule empirique :

C	représentant	la teneur	en carbone	pour 100
Mn	—	—	en manganèse	—
Ph	—	—	en phosphore	—
Si	—	—	en silicium	—

on aurait pour les faibles teneurs en manganèse, phosphore et silicium, c'est-à-dire pour les aciers au carbone ordinaires renfermant jusqu'à 1 0/0 de carbone :

$$R = 30 + 18C + 36C^2 + 18Mn + 10Si + 15Ph,$$

$$A\ 0/0 = 42 - 36C - 5{,}5Mn - 6Si$$

(sur barreaux de 100 millimètres entre coups de pointeau).

M. Osmond a proposé des formules distinctes pour les aciers Bessemer et Martin :

Acier Bessemer :

$$R = 26 + 60C + 23Mn + 11Si + 65Ph.$$

Cette formule s'applique aux aciers de 55 à 90 kilogrammes de charge de rupture, notamment aux rails.

Acier Martin :

$$R = 26 + 46,5C + 21Mn + 11Si + 65Ph.$$

Cette deuxième formule s'applique aux aciers dont la charge de rupture varie entre 35 et 65 kilogrammes.

Beaucoup d'autres formules ont été proposées, nous ne retiendrons que celles du baron Juptner. Il a trouvé :

$$R = 25 + \frac{200}{3}C + \frac{200}{7}Si + \frac{100}{7}Mn.$$

Influence des traitements. — Nous venons de parler d'aciers recuits. Si l'on compare ces résultats à ceux qui seraient obtenus sur les mêmes aciers bruts de laminage, on trouverait évidemment que ces derniers possèdent une charge de rupture plus élevée, des allongements moindres, cette transformation provenant de l'état d'écrouissage dans lequel se trouve le métal.

Donc, si l'on part d'un acier écroui, le recuit l'adoucit ; c'est bien la règle que nous avons énoncée au début de ce livre. Si l'on prolonge le recuit et si la température est assez élevée, il se produit un tout autre effet : le métal devient très cristallin, il ne possède aucun allongement et devient très fragile.

Il a été fait sur ce sujet des travaux de la plus haute importance, dans le détail desquels nous ne saurions entrer ici. Nous citerons particulièrement les recherches de Brinell, de Stansfield, etc.

Les expériences faites ont eu pour but de définir l'influence

des différents recuits et de chercher le traitement pouvant régénérer l'acier altéré.

Voici ce que dit Stansfield (Iron and Steel Institute, septembre 1903; *Revue de Métallurgie*, février 1904):

« L'acier chauffé à des températures notablement supérieures au point de recalescence devient fragile par le fait de deux phénomènes différents qui se superposent: d'une part, les grains augmentent dans le métal surchauffé, mais par un chauffage ultérieur à une température peu supérieure à celle du point de recalescence, on peut restaurer la qualité première de l'acier. Mais, d'un côté, un chauffage plus prolongé à une température plus élevée entraîne une altération du métal, qui ne peut plus être effacée par le même procédé. Ce métal est alors brûlé. »

Pour séparer ces deux phénomènes, M. Stansfield a eu soin, dans un certain nombre de ses expériences, de réchauffer le métal de façon à détruire l'effet du réchauffage et à ne conserver que l'altération du métal brûlé.

Pour que le métal soit brûlé, il semble, d'après les expériences de M. Stansfield, que la température de chauffage doive être supérieure à la température de fin de solidification de l'eutectique et que la vitesse de refroidissement soit assez grande pour que le carbone de la partie liquide ne puisse pas se diffuser pendant la solidification dans les cristaux solides.

Il en découlera que l'acier ne sera pas homogène, mais renfermera des grains cristallins moins riches que l'acier initial, séparés l'un de l'autre par des couches d'acier plus carburé.

Les surfaces seront plus fragiles et donneront au morceau d'acier une fragilité d'ensemble très considérable.

Si la brûlure de l'acier ne consistait que dans la ségrégation du carbone dans les joints intercristallins, un recuit prolongé ramènerait probablement la ductilité de l'acier en occasionnant une répartition uniforme du carbone dans la masse. Pour que le phénomène soit aussi rapide que possible, il faut recuire à haute température.

Le mot *brûlure*, employé d'ailleurs souvent à tort dans l'industrie même pour désigner simplement des aciers surchauffés,

signifie donc fusion partielle de l'acier. Il est juste d'ajouter que cette fusion est souvent accompagnée d'oxydation : en effet la fusion partielle facilite le dégagement des gaz qui donne lieu à des vides et à des soufflures dans la partie liquide et même à des fentes qui offrent une grande facilité de pénétration à l'oxygène.

Dans le recuit prolongé d'un acier, il faut donc distinguer avec M. Stansfield deux phases :

1° Surchauffage;

2° Fusion partielle appelée ordinairement brûlure.

Celle-ci peut présenter trois caractéristiques :

a) Cette fusion produit simplement la ségrégation du carbone dans les joints;

b) Cette fusion est accompagnée de liquation et produit des défectuosités ;

c) Cette fusion a lieu avec liquation profonde et oxydation dans les défectuosités.

Des expériences faites par M. Stansfield on doit conclure que :

1° L'acier qui a été simplement surchauffé peut être complètement régénéré par le chauffage juste au-dessus de son point de recalescence et refroidi ensuite;

2° L'acier dans la phase *a* peut être régénéré par un recuit approprié (à température élevée, suivi d'un réchauffage au point de recalescence pour détruire le surchauffage). Dans la phase *b*, il faut avoir recours au forgeage; et, dans la phase *c*, la régénération, si elle est possible, se fera avec une grande difficulté.

L'influence de la *trempe* sur les aciers est très différente suivant la teneur en carbone. Nous avons vu que l'influence d'une trempe faite à bonne température avait pour effet d'amener le carbure de fer à l'état de solution, de créer le constituant nommé *martensite*, qui n'est d'ailleurs pas un composé défini.

Lorsque l'acier contient très peu de carbone, la trempe est presque sans action.

Lorsque la teneur en carbone devient assez grande (aux environs de 0,300 0/0), la charge de rupture, la limite élastique et la dureté augmentent considérablement par trempe, tandis que les allongements, la fragilité et les strictions diminuent. On admet souvent que l'on a la relation suivante, dans laquelle R_t représente la charge de rupture du métal après trempe, R_r la charge de rupture du même métal après recuit :

$$R_t = R_r + 0,92\,(R_r - 32).$$

On voit que, si $R_r = 32$ (fer), on a :

$$R_t = R_r.$$

Il est de toute évidence que cette loi n'est que fort approximative.

Le *revenu*, c'est-à-dire le recuit après trempe fait à température inférieure au point de recalescence, a pour effet de diminuer l'effet de la trempe, et cela d'autant plus qu'il a lieu à une température plus rapprochée du point de recalescence. Il a, de plus, au point de vue industriel, le très grand avantage de faire presque complètement disparaître les tensions internes développées dans la trempe, lesquelles peuvent amener des ruptures subites.

III. — CONCLUSIONS

Les aciers ordinaires que consomme l'industrie renferment à l'*état recuit* deux constituants : la ferrite ou fer pur, la cémentite ou carbure de fer Fe^3C. La perlite est l'eutectique ferrite-cémentite.

Les aciers renfermant moins de 0,850 0/0 de carbone sont formés de ferrite et de perlite (aciers hypoeutectoïdes) ; ceux renfermant plus de 0,850 0/0 de carbone sont formés de perlite et de cémentite (aciers hypereutectoïdes).

Ces aciers ne sont guère utilisés que comme aciers à outils.

Les aciers hypoeutectoïdes sont utilisés dans les constructions mécaniques, métalliques, etc. Nous avons indiqué leurs emplois qui dépendent essentiellement de leurs propriétés mécaniques, c'est-à-dire de leur teneur en carbone[1].

Les aciers ne sont pas seulement des alliages fer-carbone ; ils renferment quelques impuretés, manganèse, silicium, soufre, phosphore, et nous avons indiqué sous quel état ces corps existent, d'après les travaux les plus récents.

A l'état trempé, les aciers peuvent renfermer différents constituants : martensite, troostite, sorbite, austenite, troosto-sorbite et même perlite, dont nous avons défini les caractères. L'existence de ces constituants dépend : 1° de la composition de l'acier ; 2° de la température de trempe ; 3° de la dimension des pièces ; 4° de la nature et de l'importance du bain de trempe. Les propriétés mécaniques après trempe dépendent des mêmes facteurs.

Les aciers trempés et revenus peuvent présenter les mêmes constituants. — En plus des facteurs précédents, la température de revenu a grande influence.

Les qualités mécaniques d'un acier ordinaire dépendent donc autant des traitements qu'il a subis, traitements mécaniques (laminage, martelage, etc.), traitements physiques (recuit, trempe, revenu), que de sa composition chimique. Aussi l'industriel doit-il chercher, avant tout, à définir aussi parfaitement que possible l'état sous lequel doit se trouver le métal qu'il utilise, c'est-à-dire, en somme, sa constitution.

1. En supposant la teneur des impuretés normale.

IV. — CAHIERS DES CHARGES UNIFIÉS DES CHEMINS DE FER FRANÇAIS

FERS DE FORGE

CHAPITRE I

CONDITIONS GÉNÉRALES

Classification. — Les fers de forge d'emplois courants sont classés en quatre catégories : L, M, O, P.

Fabrication. — Les paquets seront constitués avec des fers bruts de même nature, appareillés à joints croisés; chaque mise tiendra toute la longueur au paquet, sans bouts écrus.

Toute introduction, dans les paquets, de métal fondu de dénomination quelconque est interdite.

Laminage, aspect extérieur. — Les barres seront laminées avec soin; leurs surfaces unies, saines, ne doivent présenter aucun défaut : fente, crique, gerçure, manque de matière, etc..., pouvant nuire à l'emploi.

CHAPITRE II

NATURE ET PROPORTION DES ESSAIS

Nature des essais. — Les essais auxquels seront soumis les fers de forge sont les suivants :

Essais à froid :

	Sur les catégories :
Épreuve de texture....................	L, M, O, P.
— de pliage et de soudabilité....	M, O, P.
— de traction....................	L, M, O, P.

Essais à chaud :

	Sur les catégories :
Épreuve de rabattement et de perçage de trous	M, O, P.

Proportion des essais. — Le nombre de séries d'épreuves à effectuer sur chaque livraison et pour chaque qualité est proportionné aux tonnages de barres présentées, l'unité de série d'épreuves étant appliquée à :

		kilogrammes
Fers. Catégorie	L............	6.000
—	M............	5.000
—	O............	3.000
—	P............	2.000

Toute fraction peut donner lieu à une série complète d'essais, au gré de la Compagnie.

CHAPITRE III

PRÉLÈVEMENTS ET PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES

Répartition des prélèvements. — Lorsque la réception comportera plusieurs séries d'épreuves, les prélèvements seront, autant que possible, répartis proportionnellement aux tonnages de barres de *petites*, *moyennes* et *grosses sections*.

	millimètres
Les *petites* sections correspondent à d ou e	$\leq$ 25
moyennes —	de 26 à 50 inclusivement
grosses —	de 51 et au dessus

Traçage des prélèvements. — Les prélèvements sont tracés, poinçonnés et repérés sur les indications et par les soins de l'agent réceptionnaire.

Préparation des éprouvettes. — Les éprouvettes seront, suivant leurs sections, essayées soit brutes, soit après découpage ou laminage dans les conditions définies au chapitre *Modes d'essais*.

Finissage. — Sauf les exceptions spécifiées ci-après, le finissage des barreaux doit avoir lieu entièrement à froid au moyen de machines-outils, sans aucune opération de martelage.

Dans les éprouvettes méplates, les faces de laminage seront conser-

vées chaque fois qu'il sera possible; dans ce cas, les champs seuls sont travaillés.

Les arêtes des barreaux pour essais de pliage seront légèrement adoucies à la lime, sans congé appréciable.

Poinçons de la Compagnie. — Les barreaux d'essais conserveront les poinçons de la Compagnie.

CHAPITRE IV

MODES D'ESSAIS. — RÉSULTATS A OBTENIR

Conditions générales. — Les résultats à obtenir, indiqués ci-après dans chaque essai, sont des minima absolus.

Toute épreuve qui ne remplira pas complètement les conditions fixées pourra donner lieu au rebut du lot correspondant.

Essais à froid. — Épreuve de texture. — *Prélèvements.* — Sur les diverses catégories de fers de toutes sections.

Mode d'essai. — Les barres entaillées au burin ou à la tranche sont rompues brusquement en porte-à-faux, soit au marteau, soit au pilon.

Résultats. — Le fer ne doit jamais présenter, dans sa texture, de gros cristaux brillants et lamelleux ; le grain doit être demi-fin, avec arrachement, et le nerf doit être blanc, allongé et sans traces de scories.

Épreuve de pliage et de soudabilité. — *Prélèvements.* — Sur les fers des catégories M, O, P, dont d ou $e \geqq 5$ millimètres.

Les barres plates ayant moins de 15 millimètres d'épaisseur et les barres carrées rondes ou demi-rondes ayant une section inférieure à 200 millimètres carrés sont essayées sans soudure préalable.

Les fers ronds et carrés n'ayant pas plus de 25 millimètres de diamètre ou de côté, et les plats n'ayant pas plus de 22 millimètres d'épaisseur et de 40 millimètres de largeur, seront essayés bruts, après soudure.

Les fers d'épaisseurs ou de diamètres supérieurs à 25 millimètres seront préalablement réduits, par laminage ou forgeage, à l'épaisseur ou au diamètre de 25 millimètres.

Pour les fers d'épaisseurs égales ou inférieures à 25 millimètres et dont la largeur sera supérieure à 40 millimètres, les prélèvements seront ramenés, par découpage à chaud, à une largeur uniforme de 40 millimètres.

Mode d'essai de soudure. — L'éprouvette, d'une longueur de 250 milli-

mètres environ, sera rompue en son milieu en deux parties, puis soudée et forgée. Les deux parties doivent être réunies bout à bout par une soudure dite par amorce et à chaude portée. Chaque amorce, à forme convexe inclinée à 45°, présentera une surface de soudure du double environ de la section droite primitive du barreau. La soudure devra être obtenue au moyen de deux chaudes, l'une chaude suante, l'autre chaude de ressuée.

L'éprouvette sera ensuite convenablement parée.

Mode d'essai de pliage à froid. — L'éprouvette devra supporter un pliage réalisé sur un empreint au moyen d'un coin, ou dégorgeoir qui est arrondi suivant un rayon *r* au plus égal au diamètre ou à l'épaisseur du barreau.

On admettra tout autre dispositif permettant de plier le barreau à l'angle voulu sur un mandrin présentant le rayon indiqué ci-dessus.

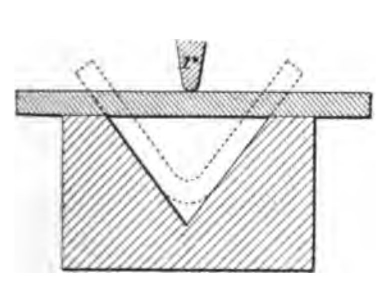


Fig. 56.

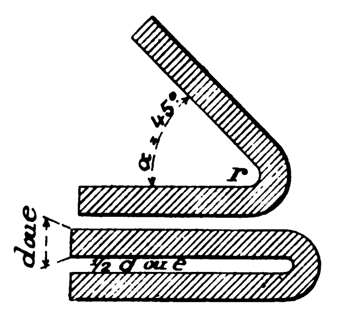


Fig. 57 et 58.

Les éprouvettes soudées seront pliées sur le plat de la soudure.

Résultats. — Fers des catégories :

M : angle intérieur maximum	....	α = 90°
O : —	....	α = 45°
P : branches parallèles, soit	....	α = 0°

Écartement maximum : 1/2 du diamètre ou de l'épaisseur.

Ces pliages doivent être obtenus sans décollement, rupture ni défaut.

Pour s'assurer, en outre, de la perfection de la soudure, on ouvrira et on fermera alternativement l'angle de pliage afin de provoquer la rupture qui devra être entièrement saine, sans parties dessoudées.

Épreuve de traction. — *Prélèvements.* — Sur les fers de toutes catégories et de toutes sections, sauf sur les échantillons d'épaisseur ou de diamètre au-dessous de 5 millimètres.

En principe, les éprouvettes sont obtenues par ajustage à froid des échantillons.

Si le fournisseur le demande, les échantillons de *petites sections* peuvent être essayés bruts.

Les éprouvettes des échantillons de *moyennes* et *grosses sections* peuvent seules être obtenues par laminage ou forgeage, en une seule chaude, suivi ou non d'ajustage à froid.

Le laminage ou forgeage doit être suivi de recuit, s'il a été fait dans des conditions de nature à écrouir le métal.

Forme des éprouvettes. — Les têtes d'attaches sont appropriées aux organes de fixation des machines d'essais : leurs formes et dimensions peuvent être considérées comme indifférentes sous la condition de ne pas créer de flexions dans le sens de l'axe de traction : têtes excentrées, non symétriques, etc.

Dans les épreuves cylindriques, les extrémités peuvent être prises entre coins striés. Dans les éprouvettes méplates, le rayon de raccordement de la partie calibrée aux têtes est uniformément de 10 millimètres.

Repères. — L'écartement entre repères, pour le relevé de l'allongement, est déterminé par la formule $L = \sqrt{66,67S}$, S étant la section.

Ces repères sont croisés à partir de la naissance des congés. La fraction entre ces repères qui servira à calculer l'allongement pour 100 sera celle comprenant la section de rupture.

Dimensions des éprouvettes. — *Éprouvettes cylindriques.* — Pas plus de 25 millimètres de diamètre.

Les dimensions à adopter de préférence sont les suivantes :

Diamètre	$22^{mm},57$
Section	400^{mm2}
Écartement entre repères	$165^{mm},00$
Longueur de la partie calibrée	$210^{mm},00$

Éprouvettes méplates. — Les éprouvettes méplates sont réunies en plusieurs séries dans chacune desquelles la largeur est constante suivant le groupement ci-après :

TABLEAU DES DIMENSIONS DES ÉPROUVETTES MÉPLATES POUR LES ÉPAISSEURS DE 5 MILLIMÈTRES A 25 MILLIMÈTRES

Largeur uniforme de 30 millimètres

ÉPAISSEUR EN MILLIMÈTRES	SECTION en MILLIMÈTRES CARRÉS	ÉCARTEMENT ENTRE REPÈRES en millimètres	LONGUEUR DE LA PARTIE CALIBRÉE en millimètres
5	150	100	
6	180	110	
7	210	120	
8	240	125	200
9	270	135	
10	300	140	

Largeur uniforme de 25 millimètres

ÉPAISSEUR EN MILLIMÈTRES	SECTION en MILLIMÈTRES CARRÉS	ÉCARTEMENT ENTRE REPÈRES en millimètres	LONGUEUR DE LA PARTIE CALIBRÉE en millimètres
11	275	135	
12	300	140	
13	325	150	
14	350	155	
15	375	160	
16	400	165	200
17	425	170	
18	450	175	
19	475	180	
20	500	185	

Largeur uniforme de 20 millimètres

ÉPAISSEUR EN MILLIMÈTRES	SECTION en MILLIMÈTRES CARRÉS	ÉCARTEMENT ENTRE REPÈRES en millimètres	LONGUEUR DE LA PARTIE CALIBRÉE en millimètres
21	420	170	
22	440		
23	460	175	200
24	480	180	
25	500	185	

Durée de l'essai. — *Température.* — L'essai a lieu par traction progressive à la température ambiante. Sa durée, selon le volume du barreau, sera comprise entre une et six minutes.

Résultats. — Les résultats à obtenir sont indiqués au tableau ci-après :

CATÉGORIES	ESSAIS DE TRACTION A FROID — RÉSISTANCE MINIMUM par millimètre carré de section primitive S	ESSAIS DE TRACTION A FROID — ALLONGEMENT MINIMUM 0/0 mesuré sur une longueur entre repères $\sqrt{66,67S}$
L	30 kilogr.	10
M	32 —	15
O	34 —	20
P	37 —	24

Essais à chaud. — Épreuves de rabattement et de perçage de trous. — PRÉLÈVEMENTS (sur les fers M, O et P) :

1° *Essais sans découpage longitudinal.* — Sur les plats de 15 à 20 millimètres d'épaisseur dont la largeur n'excède pas trois fois l'épaisseur;

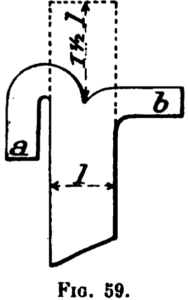


FIG. 59.

2° *Essais après un simple découpage.* — Sur les plats de 15 à 20 millimètres d'épaisseur dont la largeur trop grande est réduite par découpage à chaud d'un seul côté à une dimension égale à trois fois l'épaisseur;

3° *Essais après réduction de section par étirage ou forgeage.* — Sur tous les plats, ronds et carrés d'épaisseur, de diamètre ou de côté supérieur à 20 millimètres, dont la section sera ramenée préalablement par étirage à 60 × 20.

Les échantillons qui ne pourront être ramenés à cette section seront étirés à toute autre section inférieure, la plus forte possible, dans laquelle l'épaisseur définitive devra toujours être égale au *tiers* de la largeur.

Si la largeur des barres est, par rapport à l'épaisseur, trop grande pour permettre le forgeage dans de bonnes conditions, on pourra, exceptionnellement, procéder au découpage préalable d'une bande qui sera ensuite étirée à chaud, comme il est dit ci-dessus.

Rabattement. — Cette épreuve a lieu en une seule chaude.

Le morceau d'essai est porté au blanc soudant, et l'une de ses extrémités est fendue à la tranche, sur une longueur égale à une fois et demie la largeur de l'éprouvette : la fente n'est pas limitée par un petit trou.

Les deux parties ainsi formées sont ensuite renversées au marteau.

Pour le fer M, le rabattement a lieu à angle droit, comme en *b* du croquis (*fig.* 59).

Pour les fers O et P, les branches rabattues devront pouvoir s'appliquer sur le corps de la barre comme en *a*.

Résultats. — Ces rabattements doivent être obtenus sans prolongement de la fente, sans fissure, crique ni défaut d'aucune sorte.

Perçage de trous. — Le morceau d'essai, porté au blanc soudant, est percé, suivant la longueur, au poinçon conique, de deux trous qui auront chacun un diamètre égal à la moitié de la largeur du barreau pour les fers M et O et aux trois quarts de cette largeur pour le fer P.

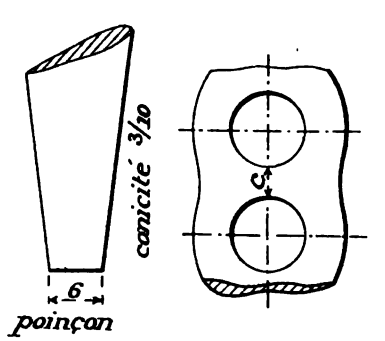


Fig. 60 et 61.

Le poinçon se termine par une partie plane ayant au plus 6 millimètres de diamètre, sa conicité est de 3 millimètres par centimètre de hauteur.

La débouchure pouvant résulter du perçage ne devra en aucun cas avoir une épaisseur dépassant 3 millimètres.

Cet essai sera fait en une seule chaude, et la toile C, séparant les deux trous, ne devra pas, après achèvement de l'essai, avoir plus de :

15	millimètres d'épaisseur	pour le fer M,
12	—	pour le fer O,
10	—	pour le fer P.

Résultats. — Bien que l'essai ne soit terminé qu'à la température du rouge sombre, on ne doit constater aucune fente, ni gerçure, ni crique, ou défaut quelconque dans toute la région soumise à l'influence du perçage des trous.

PROFILÉS ET LARGES PLATS EN FER D'EMPLOIS COURANTS

CHAPITRE I

CONDITIONS GÉNÉRALES

Classification. — Deux qualités : fer commun F1, fer ordinaire F2.

Fabrication. — Les barres proviendront de paquets bien corroyés, et leur texture ne devra pas présenter de gros grains à facettes.

Aspect extérieur. — Dressage. — Les barres seront saines, sans pailles, criques, gerçures, dessoudures, fentes, manque de matière ou autres défauts.

Les rives seront franches, sans bavures, bien ébarbées ; les congés bien remplis.

Les barres seront sans ondulations locales et bien dressées sur toute leur longueur.

Les âmes et les ailes seront planes ; les bouts seront affranchis carrément et ébarbés.

Réparation. — Toute trace de réparation, travail au marteau ou au burin ayant pour but de masquer les défauts, est une cause de rebut. L'agent réceptionnaire pourra autoriser la réparation de petits défauts superficiels, qu'il jugera sans importance pour le bon emploi de la barre.

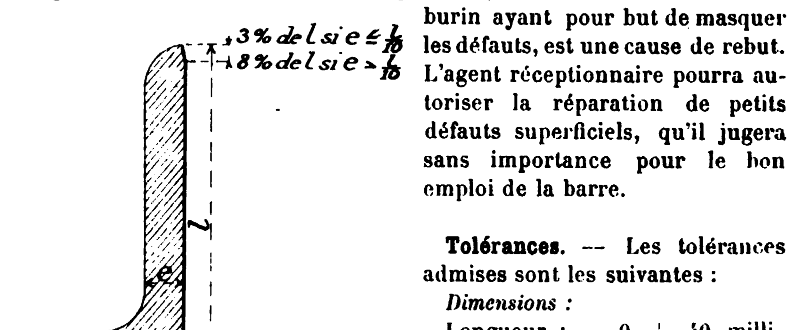


Fig. 62.

Tolérances. — Les tolérances admises sont les suivantes :

Dimensions :

Longueur : — 0 + 40 millimètres.

Hauteur et largeur : inférieures à 50 millimètres : ± 1 millimètre ; égales ou supérieures à 50 millimètres ± 2 millimètres.

Épaisseur des âmes et des ailes : inférieures ou égales à 10 millimètres; $\pm$ 0mm,5 ; supérieures à 10 millimètres $\pm$ 5 0/0.

Pour les brancards, les tolérances en hauteur sont modifiées comme suit :

$\pm$ 1mm,5 sur la hauteur totale :

$\pm$ 1/2 millimètre sur la hauteur entre les ailes.

Dans ces conditions, l'épaisseur des ailes des brancards peut varier de $\pm$ 1 millimètre.

FIG. 63.

Largeur maxima du chanfrein à l'extrémité des ailes des cornières (*fig.* 62), 3 0/0 de la largeur de l'aile, sauf les cornières dont l'épaisseur dépasse le 1/10 de la largeur et pour lesquelles la tolérance ci-dessus est portée à 8 0/0.

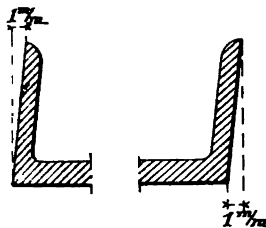


FIG. 64 et 65.

Excentricité, équerrage, dressage :

Excentricité de l'âme par rapport à la largeur de l'aile : 1 millimètre maximum.

Défaut d'équerrage des bouts : 5 millimètres maximum (*fig.* 63); des ailes : 1 millimètre maximum (*fig.* 64 et 65) ;

Défaut de dressage des barres : 5 millimètres maximum pour toute la longueur.

Défaut de dressage de l'âme : 0mm,5 maximum de flèche transversale ;

Ondulation locale : 1 millimètre maximum par mètre.

En dehors de ces limites, les barres pourront être refusées.

CHAPITRE II

NATURE ET PROPORTION DES ESSAIS

Série des essais. — *Essais à froid :*

Essai de traction sur métal à l'état de livraison....	F1, F2
Essai de pliage..............................	F2
Essai de mandrinage..........................	F2

Essais à chaud :

Essai des cornières...........................	F2
Essai de pliages successifs sur les larges plats...	F2
Essai de pliage par rabattement sur les profilés....	F1, F2

Proportion des essais. — Une série d'essais est effectuée par lot de 50 barres au plus, les barres pouvant être présentées en longueurs multiples, avant cisaillage.

CHAPITRE III

PRÉLÈVEMENTS ET PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES

Traçage des prélèvements. — Les prélèvements sont tracés, poinçonnés et repérés sur les indications et par les soins de l'agent réceptionnaire, suivant le sens du laminage. D'une façon générale, les bandes de prélèvement doivent avoir une largeur supérieure à celle des barreaux d'essais, d'une quantité au moins égale à deux fois leur épaisseur.

Découpage et finissage. — Le découpage et le finissage des barreaux doivent avoir lieu entièrement à froid, aux machines-outils. Les faces de laminage seront conservées chaque fois qu'il sera possible.

Les arêtes des barreaux pour essais de pliage seront légèrement adoucies à la lime, sans congé appréciable.

Poinçons de la Compagnie. — Les barreaux d'essais conserveront les poinçons de la Compagnie.

CHAPITRE IV

MODES D'ESSAIS. — RÉSULTATS A OBTENIR

Conditions générales. — Les résultats à obtenir, indiqués ci-après dans chaque essai, sont des minima absolus.

Toute épreuve qui ne remplira pas complètement les conditions fixées pourra donner lieu au rebut du lot correspondant.

Essai de traction. — *Prélèvements.* — Sur les barres d'une épaisseur égale ou supérieure à 5 millimètres.

Forme des éprouvettes. — Les têtes d'attache sont appropriées aux organes de fixation des machines d'essai ; leurs formes et dimensions peuvent être considérées comme indifférentes, sous la condition de ne pas créer de flexions dans le sens de l'axe de traction : têtes excentrées, non symétriques, etc...

Repères. — L'écartement L entre repères pour le relevé de l'allongement est déterminé par la formule $L = \sqrt{66,67S}$, S étant la section.

Les repères sont croisés à partir de la naissance des congés. La fraction entre ces repères, qui servira à calculer l'allongement pour 100, sera celle qui correspondra à la section de rupture.

DIMENSIONS DES ÉPROUVETTES MÉPLATES POUR LES ÉPAISSEURS JUSQU'A 30 MILLIMÈTRES

Largeur uniforme de 30 millimètres

ÉPAISSEUR EN MILLIMÈTRES	SECTION en MILLIMÈTRES CARRÉS	ÉCARTEMENT ENTRE REPÈRES en millimètres	LONGUEUR DE LA PARTIE CALIBRÉE en millimètres
5	150	100	200
6	180	110	
7	210	120	
8	240	125	
9	270	135	
10	300	140	

Largeur uniforme de 25 millimètres

ÉPAISSEUR EN MILLIMÈTRES	SECTION en MILLIMÈTRES CARRÉS	ÉCARTEMENT ENTRE REPÈRES en millimètres	LONGUEUR DE LA PARTIE CALIBRÉE en millimètres
11	275	135	200
12	300	140	
13	325	150	
14	350	155	
15	375	160	
16	400	165	
17	425	170	
18	450	175	
19	475	180	
20	500	185	

Largeur uniforme de 20 millimètres

ÉPAISSEUR EN MILLIMÈTRES	SECTION en MILLIMÈTRES CARRÉS	ÉCARTEMENT ENTRE REPÈRES en millimètres	LONGUEUR DE LA PARTIE CALIBRÉE en millimètres
21	420	170	200
22	440		
23	460	175	
24	480	180	
25	500	185	
26	520		
27	540	190	
28	560	195	
29	580		
30	600	200	

Modes d'essai. — Les charges sont rapportées au millimètre carré de la section primitive.

L'allongement total est relevé en pour 100 après la rupture.

Durée de l'essai. — *Température.* — L'essai a lieu par traction progressive à la température ambiante. Sa durée proportionnelle au volume du barreau sera comprise entre une et six minutes.

Les résultats à obtenir sont :

DÉSIGNATION	RÉSISTANCE MINIMA par millimètre carré de la section primitive	ALLONGEMENT MINIMUM 0/0 mesuré sur une longueur entre repères $\sqrt{66,67S}$
Fer commun F1....	32 kilogr.	6
Fer ordinaire F2....	34 —	12

Essai de pliage à froid. — *Prélèvements.* — Métal à l'état de livraison sur les barres F2. — Une bande de 40 millimètres de largeur sur 250 millimètres de longueur.

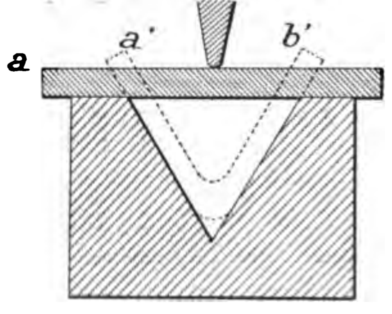


Fig. 66.

Mode d'essai. — La bande est placée tout d'abord dans la position *ab* (*fig.* 66), sur une empreinte dont les faces obliques forment entre elles un angle d'environ 60°. On applique sur le milieu de la bande un coin ou dégorgeoir arrondi suivant un rayon au plus égal à l'épaisseur de la bande et sur lequel on fait agir la presse, le pilon ou le mouton jusqu'à ce que la bande à essayer ait pris la forme *a'b'*.

Résultats. — Le rayon intérieur sera égal à l'épaisseur, et l'angle obtenu à 90°.

Ces pliages doivent être obtenus sans aucune crique, rupture ou défaut quelconque.

Essai de mandrinage à froid. — *Prélèvements.* — Sur les profilés de qualité F2 dont les ailes ont au moins 60 millimètres de largeur. Morceau de 250 millimètres de longueur.

Mode d'essai. — Un trou de 21 millimètres de diamètre sera percé à froid à la mèche, dans l'une des ailes du profilé soumis à l'épreuve. Le centre

de ce trou sera pointé à 30 millimètres du bord de l'aile et à 100 millimètres de l'une des extrémités.

Résultats. — Ce trou devra pouvoir s'agrandir à froid jusqu'au diamètre de 30 millimètres par pénétration d'un poinçon conique (conicité, 1 millimètre de diamètre par centimètre de hauteur) sous les chocs successifs d'un marteau ou d'un pilon, sans que, après l'essai, aucune apparence de fissure puisse être constatée sur un point quelconque.

Essai à chaud des cornières. — *Prélèvements.* — Deux morceaux de 100 millimètres de longueur environ, sur cornières de qualité F2.

Mode d'essai. — Chaque morceau sera porté au rouge cerise. L'un sera ouvert et l'autre fermé au marteau ou au pilon, dans les conditions ci-après.

Résultats. — L'angle des deux faces extérieures sera augmenté ou diminué de 60° avant l'apparition de crique ou de gerçure.

Essai de pliages successifs à chaud. — *Prélèvements.* — Sur les larges plats en fer de qualité F2. Une bande de 50 centimètres de longueur et de 3 à 4 centimètres de largeur.

Mode d'essai. — La bande est chauffée de façon que, sur les 2/3 environ de sa longueur, sa température décroisse, en partant de l'extrémité, du jaune au rouge cerise.

L'extrémité la plus chaude est ensuite repliée sur elle-même jusqu'à bloc, sur une longueur aussi courte que possible, puis la bande est retournée et pliée à bloc une seconde fois en sens inverse, aussi près que possible du premier pli ; on fait ainsi quatre plis successifs en retournant la bande à chaque fois de telle sorte que, l'essai terminé, l'éprouvette présente l'aspect indiqué par le croquis ci-contre (*fig.* 67).

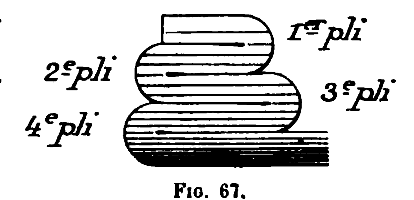


Fig. 67.

L'opération se fait en une seule chaude, au marteau à main aidé du marteau à devant ou du pilon.

Elle est conduite de telle façon que les plis successifs étant faits à des températures successivement décroissantes, le dernier soit terminé au rouge sombre (600° environ).

Résultats. — Aucun des quatre plis ainsi effectués ne doit présenter de crique, gerce ou autre défaut.

Essai de pliage à chaud par rabattement. — *Prélèvements.* — Sur les profilés des qualités F1 et F2.

Mode d'essai. — 1° Sur les barres T et L, le morceau de 700 millimètres environ est porté au rouge cerise et doit pouvoir supporter, sans fente ni gerçure un pliage effectué au marteau jusqu'à l'angle indiqué ci-après.

2° Sur les barres I et U, le morceau de longueur suffisante est fendu à froid, de façon à diviser l'âme sur une longueur *l* égale à trois fois la hauteur *h* du profilé ; cette fente est limitée par un trou percé à froid (*fig.* 68).

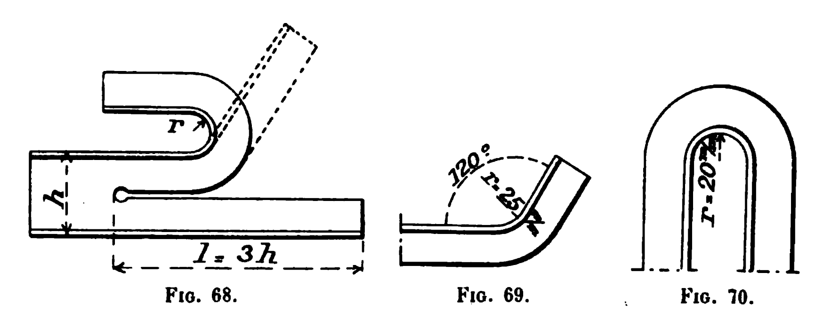


Fig. 68. Fig. 69. Fig. 70.

L'une des branches de l'extrémité fendue doit pouvoir ensuite supporter, à la température du rouge cerise, un pliage effectué au marteau jusqu'à l'angle indiqué ci-après, sans qu'il se produise ni fente, ni gerçure.

RÉSULTATS

DÉSIGNATION	ANGLE OBTENU	RAYON de RACCORDEMENT des DEUX BRANCHES de l'angle	NOMBRE DE CHAUDES POUR EFFECTUER LE PLIAGE FIXÉ CI-CONTRE	
Fer F1	120° *fig.* 69	25mm	1 chaude pour	L et T au-dessous de 100mm I et U au-dessous de 200mm
			2 chaudes pour	L et T de 100 millimètres et au dessus. I et U de 200 millimètres inclus à 300mm exclus.
Fer F2	0° *fig.* 70	20mm	3 chaudes pour	I et U de 300 millimètres et au dessus.

PROFILÉS ET LARGES PLATS EN ACIER

CHAPITRE I

CONDITIONS GÉNÉRALES

Classification. — Deux qualités : acier A1 ; acier A2.

Fabrication. — L'acier sera de bonne qualité; les barres, laminées avec soin, seront affranchies convenablement de la tête et de la culée du lingot.

Tolérances. — Comme pour les profilés et larges plats en fer.

CHAPITRE II

NATURE ET PROPORTIONS DES ESSAIS

Série des essais. — *Essais à froid :*

Essai de traction sur métal à l'état de livraison.	A-1 et A-2
Essai de pliage — —	
Essai de mandrinage — —	

Essais à chaud :

Essai de pliages successifs........................ A-1 et A-2

Proportion des essais. — Une série d'essais est effectuée par lot de 50 barres au plus, les barres pouvant être présentées en longueurs multiples avant cisaillage.

CHAPITRE III

PRÉLÈVEMENTS ET PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES

Traçage des prélèvements. — Les prélèvements sont tracés, poinçonnés et séparés sur les indications et par les soins de l'agent réceptionnaire

suivant le sens du laminage. D'une façon générale, les bandes de prélèvement doivent avoir une largeur supérieure à celle des barreaux d'essais, d'une quantité au moins égale à deux fois leur épaisseur.

Découpage et finissage. — Le découpage et le finissage des barreaux doivent avoir lieu entièrement à froid, aux machines-outils sans aucune opération ultérieure de trempe, ni recuit.

Les faces de laminage seront conservées chaque fois qu'il sera possible. Les arêtes des barreaux pour essai de pliage seront légèrement adoucies à la lime, sans congé appréciable.

Poinçons de la Compagnie. — Les barreaux d'essais conserveront les poinçons de la Compagnie.

CHAPITRE IV

MODES D'ESSAI. — RÉSULTATS A OBTENIR

Condition générale. — Les résultats à obtenir, indiqués ci-après dans chaque essai, sont des minima absolus.

Toute épreuve qui ne remplira pas complètement les conditions fixées pourra donner lieu au rebut du lot correspondant.

Essai de traction. — *Prélèvements.* — Sur les barres d'une épaisseur égale ou supérieure à 5 millimètres.

Forme des éprouvettes. — Les têtes d'attache sont appropriées aux organes de fixation des machines d'essai; leurs formes et dimensions peuvent être considérées comme indifférentes, sous la condition de ne pas créer de flexions dans le sens de l'axe de traction : têtes excentrées non symétriques, etc.

Repères. — L'écartement L entre repères, pour le relevé de l'allongement, est déterminé par la formule $L = \sqrt{66,67S}$, S étant la section. Les repères sont croisés à partir de la naissance des congés. La fraction entre ces repères qui servira à calculer l'allongement pour 100 sera celle qui correspondra à la section de rupture.

Mode d'essai. — Les charges sont rapportées au millimètre carré de la section primitive. L'allongement total est relevé en pour 100 après la rupture.

Durée de l'essai. — *Température.* — L'essai a lieu par traction progressive à la température ambiante. Sa durée, proportionnelle au volume du barreau, sera comprise entre une et six minutes.

Résultats. — Les résultats à obtenir sont :

DÉSIGNATION	RÉSISTANCE MINIMA par millimètre carré DE LA SECTION PRIMITIVE	ALLONGEMENT MINIMUM 0/0 MESURÉ SUR UNE LONGUEUR entre repères $L = \sqrt{66,67S}$
Acier A1......	35 kilogr.	28
Acier A2......	38 —	23

Essais de pliage à froid. — *Prélèvements.* — Métal à l'état de livraison, sur les profilés et larges plats une bande de 40 millimètres de largeur sur 250 millimètres de longueur.

Mode d'essai. — La bande est placée tout d'abord dans la position *ab* (*fig.* 70) sur un empreint dont les faces obliques forment entre elles un angle d'environ 90°.

On applique sur le milieu de la bande un coin ou dégorgeoir arrondi suivant un rayon au plus égal à l'épaisseur de la bande et sur lequel on fait agir la presse, le pilon ou le mouton, jusqu'à ce que la bande à essayer ait pris la forme *a'b'* ; on enlève ensuite l'empreint, et les branches sont resserrées, ou pliées à bloc, suivant le cas, à la presse ou à marteau, avec interposition de cales, s'il y a lieu.

Résultats. — Les bandes prélevées dans la qualité d'acier A1 doivent supporter le pliage à bloc, et celles prélevées dans la qualité d'acier A2 doivent pouvoir être pliées suivant un rayon intérieur égal à l'épaisseur, les branches étant parallèles.

Ces pliages doivent être obtenus sans aucune crique, rupture ou défaut quelconque.

Essai de mandrinage à froid. — *Prélèvements.* — Sur les profilés dont les ailes ont au moins 60 millimètres de largeur. Morceau de 250 millimètres de longueur.

Mode d'essai. — Un trou de 21 millimètres de diamètre sera percé à froid à la mèche, dans l'une des ailes du profilé soumis à l'épreuve. Le centre de ce trou sera pointé à 38 millimètres du bord de l'aile et à 100 millimètres de l'une des extrémités.

Résultats. — Ce trou devra pouvoir s'agrandir à froid, jusqu'au diamètre de 35 millimètres par pénétration d'un poinçon conique (conicité, 1 millimètre de diamètre par centimètre de hauteur) sous les chocs successifs d'un marteau ou d'un pilon, sans que, après l'essai, aucune apparence de fissure puisse être constatée sur un point quelconque.

Essai de pliages successifs à chaud. — *Prélèvements.* — Sur les profilés et les larges plats : une bande de 50 centimètres de long et de 3 à 4 centimètres de largeur.

Mode d'essai. — La bande est chauffée de façon que, sur les 2/3 environ de

sa longueur, sa température décroisse, en partant de l'extrémité, du jaune au rouge cerise.

L'extrémité la plus chaude est ensuite repliée sur elle-même jusqu'à bloc, sur une longueur aussi courte que possible ; puis la bande est retournée et pliée à bloc une seconde fois en sens inverse, aussi près que possible du premier pli ; on fait ainsi quatre plis successifs en retournant la bande à chaque fois, de telle sorte que, l'essai terminé, l'éprouvette présente l'aspect indiqué par la figure 67.

L'opération se fait en une seule chaude, au marteau à main aidé du marteau à devant ou du pilon.

Elle est conduite de telle façon que, les plis successifs étant faits à des températures successivement décroissantes, le dernier soit terminé au rouge sombre (600° environ).

Résultats. — Aucun des quatre plis ainsi effectués ne doit présenter de crique, gerce ou autre défaut.

BARRES RONDES EN ACIER POUR RIVETS, BOULONS ET TIRANTS

CHAPITRE I

CONDITIONS GÉNÉRALES

Classification. — Les barres rondes en acier pour rivets, boulons et tirants, sont classées en trois qualités : H, I et K.

Fabrication. — Les lingots employés à la fabrication de l'acier H proviendront de coulées obtenues indifféremment au convertisseur ou au four Martin, à moins d'indications spéciales sur le marché ou la commande.

Les aciers des catégories I et K seront obtenus comme suit, sauf indications spéciales contraires : les lingots proviendront exclusivement de coulées obtenues au four Martin sur sole basique. L'emploi dans les charges de fontes phosphoreuses est absolument interdit.

Les lingots devront avoir une section au moins égale à cinquante fois celle de la barre à obtenir. Après cisaillage, les barres devront être complètement affranchies de toutes parties souffleuses provenant de la tête et du pied du lingot et de toute trace de la poche de retassement.

CHAPITRE II

NATURE ET PROPORTION DES ESSAIS

Nature des essais. — Les essais auxquels seront soumises les barres sont les suivants :

	Catégories :
Essais à froid :	
Épreuve de texture	H, I, K.
— de pliage ordinaire	K.
— de pliage, soudabilité et trempe...	H, I.
— de traction	H, I, K.
Essai à chaud :	
Épreuve de pliage simple	K.
— — successifs	H, I.
Essais à chaud et à froid :	
Épreuves de confection de têtes de rivets..	H, I.

Il pourra, en outre, être fait un essai pour déterminer la teneur en phosphore, laquelle ne devra pas excéder 0,05 0/0.

Proportion des essais. — Le nombre des séries d'épreuves à effectuer sur chaque livraison est proportionné aux tonnages de barres présentées, l'unité de séries d'épreuves étant fixée :

Pour la catégorie H, à	2.000	kilogrammes
Pour les catégories I et K, à....	1.000	—

Toute fraction peut donner lieu à une série complète au gré de la Compagnie.

CHAPITRE III

PRÉLÈVEMENTS ET PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES

Répartition des prélèvements. — Lorsque la réception comportera plusieurs séries d'épreuves, les prélèvements seront, autant que possible, répartis proportionnellement à l'importance des lots des diverses sections.

Traçage des prélèvements. — Les prélèvements sont tracés, poinçonnés et repérés sur les indications et par les soins de l'agent réceptionnaire.

Préparation des éprouvettes. — Les différentes éprouvettes seront préparées dans les conditions définies au chapitre *Modes d'essais.*

Finissage. — Le travail de préparation des barreaux ajustés doit avoir lieu entièrement à froid, au moyen de machines-outils sans aucune opération de martelage, trempe ni recuit.

Poinçons de la Compagnie. — Les barreaux d'essai conserveront les poinçons de la Compagnie.

CHAPITRE IV

MODES D'ESSAIS. — RÉSULTATS A OBTENIR

Conditions générales. — Les résultats à obtenir, indiqués ci-après dans chaque essai, sont des minima absolus.

Toute épreuve qui ne remplira pas complètement les conditions fixées pourra donner lieu au rebut du lot correspondant.

Essais à froid. — Épreuve de texture. — *Prélèvements.* — Sur les barres de toutes sections des trois catégories.

Mode d'essai. — Les barres entaillées au burin ou à la tranche sont rompues brusquement en porte-à-faux, soit au marteau, soit au pilon.

Résultats. — La cassure doit être homogène et sans défaut.

Épreuve de pliage ordinaire. — *Prélèvements* (sur l'acier de la catégorie K). — N'ont lieu que sur les échantillons dont $d \geqq 5$ millimètres. Les barres n'ayant pas plus de 25 millimètres de diamètre seront essayées brutes. Celles de diamètres supérieurs à 25 millimètres seront préalablement réduites, par laminage ou forgeage, au diamètre de 25 millimètres.

Mode d'essai. — Les prélèvements d'une longueur de 240 millimètres devront supporter un pliage réalisé sur un empreint au moyen d'un coin ou dégorgeoir arrondi suivant un rayon au plus égal au diamètre du barreau. On admettra tout autre dispositif permettant de plier la barrette à l'angle voulu sur un mandrin présentant le rayon indiqué ci-dessus.

Résultats. — Le pliage réalisé à branches parallèles, avec un écartement intérieur égal au diamètre de la barre, devra être obtenu sans rupture ni crique.

Épreuves de pliage, soudabilité et trempe. — *Prélèvements* (aciers H et I seulement). — Sur les échantillons dont $d \geqq 5$ millimètres. Les barres d'un diamètre égal ou inférieur à 15 millimètres seront essayées sans soudure préalable.

Celles n'ayant pas plus de 25 millimètres de diamètre seront essayées brutes.

Les échantillons de diamètre supérieur à 25 millimètres seront ramenés par laminage ou forgeage au diamètre de 25 millimètres.

Mode d'essai de soudure. — L'éprouvette d'une longueur de 250 millimètres environ sera rompue en son milieu en deux parties, puis soudée et forgée. Les deux parties doivent être réunies bout à bout par une soudure dite par amorces et à chaude portée. Chaque amorce, à forme convexe, inclinée à 45°, présentera une surface de soudure double environ de la section droite primitive du barreau.

La soudure devra être obtenue au moyen de deux chaudes : l'une, chaude suante ; l'autre, chaude de ressuée.

L'éprouvette sera ensuite convenablement parée.

Mode de trempe et de pliage. — Les barreaux sont chauffés au rouge cerise un peu sombre (700°) et trempés à l'eau à 28°, le volume d'eau étant considérable par rapport à celui de l'éprouvette.

Après refroidissement, les barreaux seront pliés de la même façon que pour le pliage ordinaire.

Résultats. — Pliage à bloc, sur le plat de la soudure, sans crique ; diamètre maximum de l'œil : 5 millimètres.

Épreuve de traction. — *Prélèvements.* — Les barreaux seront essayés bruts ou terminés à froid au tour.

Forme des éprouvettes. — Les têtes d'attaches sont appropriées aux organes de fixation des machines d'essais; leurs formes et dimensions peuvent être considérées comme indifférentes, sous la condition de ne pas créer de flexions dans le sens de l'axe de traction : têtes excentrées, non symétriques, etc...

Repères. — L'écartement entre repères, pour le relevé de l'allongement, est déterminé par la formule $L = \sqrt{66,67S}$ (S étant la section). Ces repères seront croisés à partir de la naissance des congés. La fraction entre les repères qui servira à calculer l'allongement pour 100 sera celle comprenant la section de rupture.

Dimensions des éprouvettes. — Les ronds de 25 millimètres de diamètre et au dessous peuvent être essayés bruts si le fournisseur le désire, les extrémités généralement prises entre coins striés.

Pour les barres de diamètres supérieurs à 25 millimètres l'éprouvette sera cylindrique avec longueur calibrée, façonnée au tour et extrémités généralement prises entre les coins striés.

L'éprouvette-type à prendre de préférence, en ce dernier cas, est la suivante :

Diamètre..................................	$25^{mm},57$
Section..................................	400^{mm^2}
Écartement entre repères..................	$165^{mm},00$
Longueur de la partie calibrée............	$210^{mm},00$

Durée de l'essai. — Température. — L'essai a lieu par traction progressive, à la température ambiante. Sa durée, selon le volume du barreau, sera comprise entre une et six minutes.

Résultats. — Les résultats à obtenir sont indiqués au tableau ci-après :

CATÉGORIES	ESSAIS DE TRACTION A FROID	
	RÉSISTANCE MINIMA par millimètre carré de la section primitive S	ALLONGEMENT MINIMUM 0/0 mesuré sur une longueur entre repères $\sqrt{66,67S}$
H	36 kilogr.	22
I	38 —	28
K	50 —	21

Essais à chaud. — Épreuve de pliage simple. — *Prélèvements* (sur l'acier K seulement). — N'ont lieu que sur les échantillons dont $d \geqq 5$ millimètres.

Les échantillons de diamètres supérieurs à 15 millimètres seront préalablement réduits par laminage ou forgeage à un diamètre de 15 millimètres.

Ceux n'ayant pas plus de 15 millimètres de diamètre seront essayés bruts.

Mode d'essai. — Le morceau, d'une longueur de 50 centimètres environ, est chauffé de façon que, sur les 2/3 environ de sa longueur, sa température décroisse, en partant de l'extrémité, du jaune au rouge cerise.

L'extrémité la plus chaude est ensuite repliée sur elle-même jusqu'à bloc sur une longueur aussi courte que possible, puis la barre est retournée et pliée à bloc une seconde fois, en sens inverse, aussi près que possible du premier pli; on fait ainsi quatre plis successifs en retournant la barre à chaque fois, de telle sorte que, l'essai terminé, l'éprouvette présente l'aspect indiqué par le croquis ci-contre.

L'opération se fait en une seule chaude, au marteau à main aidé du marteau à devant ou du pilon.

Elle est conduite de telle façon que, les plis successifs étant faits à des températures successivement décroissantes, le dernier soit terminé au rouge sombre (600° environ).

Résultats. — Aucun des quatre plis ainsi effectués ne doit présenter de crique, gerce ou autre défaut.

Essais à chaud et à froid. — Épreuves de confection de têtes de rivets. — *Prélèvements* (sur les aciers H et I). — Morceaux bruts d'environ 150 millimètres de longueur.

Mode d'essai. — Confection de quatre têtes de rivets, dont deux à chaud et deux à froid, par série d'essais.

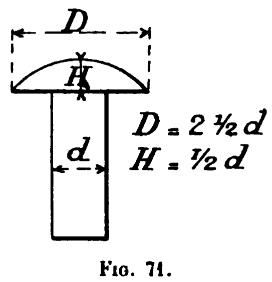


Fig. 71.

A chaud. — En une seule chaude. Le morceau d'essai est chauffé à l'un des bouts, puis refoulé et bouterollé, de façon à produire une tête de rivet sensiblement circulaire d'un diamètre D égal à deux fois et demie le diamètre d de la barre essayée et d'une hauteur H égale à la moitié de ce diamètre d.

A froid. — L'extrémité du morceau est rivée en goutte de suif, au marteau à main et à petits coups, de façon à donner à la tête les dimensions D et H ci-après :

	D MINIMUM	H MAXIMUM
Pour les barres de diamètre $d \leq 22^{mm}$....	1,5 d	1/2 d
— $d > 22^{mm}$....	$11^{mm} + d$	1/2 d

Résultats. — Ces têtes de rivets, dans l'une et l'autre épreuve, doivent être obtenues sans gerçure, crique ou autre défaut.

ACIERS DE FORGE EN BARRES, BLOOMS, BILLETTES, LARGETS, ETC.

CHAPITRE I

CONDITIONS GÉNÉRALES

Classification. — Les aciers de forge sont classés en six catégories : A, B, C, D, E et G, les catégories C, D, E, G, étant elles-mêmes subdivisées en CC, DD, EE et GG, suivant les indications données ci-après dans le paragraphe *Fabrication*.

Fabrication. — Sauf prescriptions spéciales contraires stipulées au marché, à la commande ou sur les dessins :

1° Les aciers des catégories A et B proviendront de coulées obtenues indifféremment au convertisseur ou au four Martin ;

2° Pour les catégories C, CC, D, DD, E, EE, G et GG : les lingots proviendront exclusivement de coulées obtenues au four Martin sur sole basique ; l'emploi, dans les charges, de fonte contenant plus de 0,1 0/0 de phosphore, est absolument interdit;

3° Pour les catégories C, D, E et G : la section du bloom obtenu sera au plus égale à 1/4 de la section du lingot;

4° Pour les catégories CC, DD, EE et GG : les lingots seront étirés au pilon ou à la presse, de façon que la section du bloom obtenu soit au plus égale à 1/8 de la section du lingot.

Ce coefficient de corroyage sera réduit à 1/4 si le bloom doit avoir une section supérieure à 4 décimètres carrés.

Après ce premier corroyage, on pourra terminer le forgeage au pilon, à la presse ou au laminoir ;

5° Pour toutes les catégories sans exception, les blooms, billettes ou barres seront soigneusement affranchis des parties souffleuses provenant de la tête et du pied du lingot et de toute trace de la poche de retassement.

CHAPITRE II

NATURE ET PROPORTION DES ESSAIS

État des échantillons à la présentation. — Les échantillons sont présentés après affranchissement des bouts.

Nature des essais. — Les essais auxquels seront soumis les aciers de forge sont les suivants :

Essais à froid :

Épreuve de texture......................	Toutes les catégories
— de pliage ordinaire..............	C, CC, D, DD, E, EE, G, GG.
— de pliage, soudabilité et trempe..	A, B.
— de traction......................	Toutes les catégories.
— par choc sur barreau............	D, DD, E, EE, G, GG.

Essais à chaud :

Épreuves de pliages successifs............	A, B.

Il pourra, en outre, être fait un essai pour déterminer la teneur en phosphore, laquelle ne devra pas excéder 0,06 0/0, quelle que soit la catégorie.

Proportion des essais. — Le nombre des séries d'épreuves à effectuer sur chaque livraison et pour chaque qualité est proportionné aux ton-

nages de barres présentées, l'unité de série d'épreuves étant appliquée à 3.000 kilogrammes.

Toute fraction peut donner lieu à une série complète d'essais, au gré de la Compagnie.

CHAPITRE III

PRÉLÈVEMENT ET PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES

Répartition des prélèvements. — Lorsque la réception comportera plusieurs séries d'épreuves, les prélèvements seront, autant que possible, réparties proportionnellement aux tonnages des différentes sections.

Traçage des prélèvements. — Les prélèvements sont tracés, poinçonnés, et repérés sur les indications et par les soins de l'agent réceptionnaire.

Préparation des éprouvettes. — Les prélèvements seront, suivant leurs sections, essayés soit bruts, soit après découpage ou laminage, dans les conditions définies au chapitre *Modes d'essai*.

Finissage. — Le travail de préparation des barreaux ajustés doit avoir lieu entièrement à froid, au moyen de machines-outils, sans aucune opération de martelage, trempe ni recuit.

Dans les éprouvettes méplates, les faces de laminage seront conservées chaque fois qu'il sera possible ; dans ce cas, les champs seuls seront travaillés.

Les arêtes des barreaux pour essais de pliage seront légèrement adoucies à la lime, sans congé appréciable.

Poinçons de la Compagnie. — Les barreaux d'essais conserveront les poinçons de la Compagnie.

CHAPITRE IV

MODES D'ESSAIS. — RÉSULTATS A OBTENIR

Conditions générales. — Les résultats à obtenir, indiqués ci-après dans chaque essai, sont des minima absolus. Toute épreuve qui ne remplira pas complètement les conditions fixées pourra donner lieu au rebut du lot correspondant.

Essais à froid. — Épreuve de texture. — *Prélèvements.* — Sur les diverses catégories d'aciers : n'ont lieu que sur des échantillons de sections inférieures à 10.000 millimètres carrés.

Mode d'essai. — Les échantillons entaillés au burin ou à la tranche, sur tout le pourtour de leur section, sont rompus brusquement en porte-à-faux, soit au marteau, soit au pilon.

Résultats. — Les cassures devront être homogènes et sans défauts.

Épreuve de pliage ordinaire. — *Prélèvements.* — Sur les aciers des catégories C, CC, D, DD, E, EE, G, GG : n'ont lieu que sur des échantillons dont l'épaisseur *e* ou le diamètre *d* est égal ou supérieur à 5 millimètres.

Les échantillons ronds et carrés n'ayant pas plus de 25 millimètres de diamètre ou de côté et les plats n'ayant pas plus de 25 millimètres d'épaisseur et de 40 millimètres de largeur, seront essayés bruts.

Les barres ou échantillons d'épaisseur ou de diamètres supérieurs à 25 millimètres seront préalablement réduits par laminage ou forgeage en une seule chaude, à l'épaisseur ou au diamètre de 25 millimètres.

Pour les échantillons d'épaisseurs égales ou inférieures à 25 millimètres dont la largeur sera supérieure à 40 millimètres, les prélèvements seront ramenés, par découpage à chaud et parage à la lime, à une largeur uniforme de 40 millimètres.

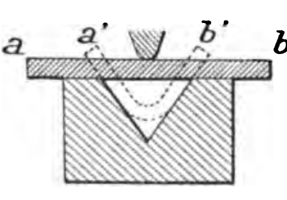


Fig. 72.

Le laminage, forgeage ou découpage doit être suivi de recuit; s'il a été fait dans des conditions de nature à écrouir le métal, les divers prélèvements auront une longueur d'environ 25 millimètres.

Mode d'essai. — Le prélèvement est placé tout d'abord dans la position *ab* (*fig.* 72) sur un empreint dont les faces obliques forment entre elles un angle d'environ 60°. On applique sur le milieu du prélèvement un coin ou dégorgeoir arrondi suivant un rayon au plus égal à l'épaisseur ou au diamètre du barreau et sur lequel on fait agir la presse, le pilon ou le mouton jusqu'à ce que le barreau ait pris la forme *a'b'*. On enlève ensuite l'empreint, et les branches sont resserrées à la presse ou au marteau, avec interposition de cales, s'il y a lieu.

RÉSULTATS

CATÉGORIES	PLIAGE	ÉCARTEMENT INTÉRIEUR MAXIMUM DES BRANCHES X
C ou CC	à branches parallèles	X
D ou DD	—	X
E ou EE	—	1 1/2 X
G ou GG	—	2 1/2 X

Les pliages doivent être obtenus sans crique, rupture ou défaut quelconque.

Épreuve de pliage, soudabilité et trempe. — *Prélèvements* (aciers A et B seulement). — Sur les échantillons dont d ou $e \geq 5$ millimètres. Les barres plates ayant moins de 15 millimètres d'épaisseur et les barres carrées, rondes ou demi-rondes, ayant une section inférieure à 200 millimètres carrés, sont essayées sans soudure préalable.

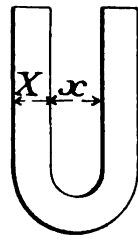


Fig. 73.

Les échantillons ronds et carrés n'ayant pas plus de 25 millimètres de diamètre ou de côté, et les plats n'ayant pas plus de 25 millimètres d'épaisseur et de 40 millimètres de largeur, seront essayés bruts.

Les échantillons d'épaisseurs ou de diamètres supérieurs à 25 millimètres seront préalablement réduits, par laminage ou forgeage, en une seule chaude, à l'épaisseur ou au diamètre de 25 millimètres.

Pour les échantillons d'épaisseurs égales ou inférieures à 25 millimètres et dont la largeur sera supérieure à 40 millimètres, les prélèvements seront ramenés par découpage à chaud à une largeur uniforme de 40 millimètres.

Ces divers prélèvements auront une longueur d'environ 250 millimètres.

Mode d'essai de soudure. — L'éprouvette sera rompue en son milieu en deux parties, puis soudée et forgée. Les deux parties doivent être réunies bout à bout par une soudure dite par amorce et à chaude portée.

Chaque amorce, à forme convexe, inclinée à 45°, présentera une surface de soudure du double environ de la section droite primitive du barreau.

La soudure devra être obtenue au moyen de deux chaudes : l'une, chaude suante; l'autre, chaude de ressuée.

L'éprouvette sera ensuite convenablement parée.

Mode de trempe et de pliage. — Les barreaux sont chauffés au rouge cerise un peu sombre (700°) et trempés à l'eau à 28°, le volume d'eau étant considérable par rapport à celui de l'éprouvette.

Après refroidissement, les barreaux seront pliés de la même façon que pour le pliage ordinaire (*fig.* 72) jusqu'au parallélisme des deux branches, avec un écartement intérieur égal à leur diamètre ou épaisseur X (*fig.* 73). Les éprouvettes soudées seront pliées sur le plat de la soudure.

Résultats. — Ce pliage doit être obtenu sans décollement, rupture ni défaut. Pour s'assurer, en outre, de la perfection de la soudure, on ouvrira et on fermera alternativement l'angle de pliage, afin de provoquer la rupture, qui devra être entièrement saine, sans parties dessoudées.

Épreuve de traction. — *Prélèvements.* — Sur les aciers de toute catégorie et de toutes sections, sauf sur les échantillons d'épaisseur ou de diamètre < 5 millimètres.

En principe, les éprouvettes sont obtenues par ajustage à froid des échantillons.

Si le fournisseur le demande, les échantillons dont le diamètre ou l'épaisseur est $\leqq$ 25 millimètres peuvent être essayés bruts. Les éprouvettes des échantillons dont le diamètre ou l'épaisseur est $>$ 25 millimètres peuvent être obtenues par laminage ou forgeage, en une seule chaude, suivi ou non d'ajustage à froid. Le laminage ou forgeage doit être suivi de recuit, s'il a été fait dans des conditions de nature à écrouir le métal.

Forme des éprouvettes. — Les têtes d'attaches sont appropriées aux organes de fixation des machines d'essais. Leurs formes et dimensions peuvent être considérées comme indifférentes, sous la condition de ne pas créer de flexions dans le sens de l'axe de traction : têtes excentrées, non symétriques, etc.

Dans les éprouvettes cylindriques, les extrémités sont généralement prises entre coins striés. Dans les éprouvettes méplates, les rayons de raccordement de la partie calibrée aux têtes seront uniformément de 10 millimètres.

Repères. — L'écartement entre repères, pour le relevé de l'allongement, est déterminé par la formule $L = \sqrt{66,67S}$ (S étant la section).

Ces repères sont croisés à partir de la naissance des congés.

La fraction entre ces repères qui servira à calculer l'allongement pour 100 sera celle comprenant la section de rupture.

Dimensions des éprouvettes. — *Éprouvettes cylindriques.* — Pas plus de 25 millimètres de diamètre.

Les dimensions à adopter de préférence sont les suivantes :

	ACIERS A ET B	ACIERS C, CC, D, DD, E, EE, G, GG.
Diamètre	22mm,57	15mm,96
Section	400mm²	200mm²
Ecartement entre repères	165mm,00	115mm,00
Longueur de la partie calibrée	210mm,00	147mm,00

Éprouvettes méplates. — Les éprouvettes sont réunies en plusieurs séries dans chacune desquelles la largeur est constante suivant le groupement ci-après.

TABLEAU DES DIMENSIONS DES ÉPROUVETTES MÉPLATES POUR LES ÉPAISSEURS DE 5 A 25 MILLIMÈTRES

Largeur uniforme de 30 millimètres

ÉPAISSEUR EN MILLIMÈTRES	SECTION en MILLIMÈTRES CARRÉS	ÉCARTEMENT ENTRE REPÈRES en millimètres	LONGUEUR DE LA PARTIE CALIBRÉE en millimètres
5	150	100	
6	180	110	
7	210	120	
8	240	125	200
9	270	135	
10	300	140	

Largeur uniforme de 25 millimètres

ÉPAISSEUR EN MILLIMÈTRES	SECTION en MILLIMÈTRES CARRÉS	ÉCARTEMENT ENTRE REPÈRES en millimètres	LONGUEUR DE LA PARTIE CALIBRÉE en millimètres
11	275	135	
12	300	140	
13	325	150	
14	350	155	
15	375	160	200
16	400	165	
17	425	170	
18	450	175	
19	475	180	
20	500	185	

Largeur uniforme de 20 millimètres

ÉPAISSEUR EN MILLIMÈTRES	SECTION en MILLIMÈTRES CARRÉS	ÉCARTEMENT ENTRE REPÈRES en millimètres	LONGUEUR DE LA PARTIE CALIBRÉE en millimètres
21	420	170	
22	440		
23	460	175	200
24	480	180	
25	500	185	

Durée de l'essai. — Température. — L'essai a lieu par traction progressive à la température ambiante. Sa durée, selon le volume du barreau, sera comprise entre une et six minutes.

Résultats. — Les résultats à obtenir sont indiqués au tableau ci-après :

CATÉGORIES	ESSAIS DE TRACTION A FROID	
	RÉSISTANCE MINIMUM par millimètre carré de section primitive S	ALLONGEMENT MINIMUM 0/0 mesuré sur une longueur entre repères $\sqrt{66,67S}$
A	35 kilogr.	30
B	40 —	28
C ou CC	45 —	25
D ou DD	50 —	22
E ou EE	55 —	20
G ou GG	70 —	15

Épreuve par choc sur barreau. — *Prélèvements.* — Sur les catégories D, DD, E, EE, G et GG.

Il n'est pas fait d'essai de choc sur les barres dont le diamètre ou la plus petite dimension de la section est inférieur à 45 millimètres.

Dimensions. — Préparation des éprouvettes. — Les barreaux d'essais auront une section carrée de 30 millimètres de côté et une longueur de 200 millimètres. Ils seront découpés dans la masse et terminés à froid aux machines-outils sans aucune opération ultérieure de trempe ni de recuit. Leurs surfaces et leurs arêtes seront adoucies par la lime.

Mode d'essai. — Chaque barreau placé horizontalement sur deux couteaux espacés de 160 millimètres d'axe en axe et fixés sur une enclume pesant au moins 500 kilogrammes devra supporter le choc d'un mouton du poids de 500 kilogrammes tombant librement d'une hauteur constante de 3 mètres au milieu de l'intervalle des points d'appui.

La panne du mouton sera terminée par une partie cylindrique à rayon de 15 millimètres environ, sur un développement de 90°.

Après avoir supporté un premier choc, le barreau sera retourné sens dessus dessous et recevra deux chocs consécutifs, puis alternativement deux chocs dans chaque sens jusqu'à rupture.

Les barreaux doivent pouvoir supporter avant crique ou rupture les nombre de chocs ci-après :

Catégorie D ou DD.....	9 chocs	tels qu'ils sont définis ci-dessus.
— E ou EE.....	6 —	
— G ou GG.....	4 —	

Pour se renseigner en outre sur la qualité du métal, l'essai sera toujours poursuivi jusqu'à la rupture du barreau.

Essai à chaud. — Épreuve de pliages successifs. — *Prélèvements* (sur les aciers des catégories A et B). — N'ont lieu que sur les échantillons dont d ou $e \leq 5$ millimètres.

Les échantillons de diamètre ou d'épaisseur supérieurs à 15 millimètres seront préalablement réduits par laminage ou forgeage à un diamètre ou à une épaisseur de 15 millimètres.

Pour les épaisseurs égales ou inférieures à 15 millimètres et dont la largeur sera supérieure à 40 millimètres, les prélèvements sont ramenés par découpage à une largeur uniforme de 40 millimètres.

Les aciers ronds et carrés n'ayant pas plus de 15 millimètres de diamètre ou de côté et les plats n'ayant pas plus de 15 millimètres d'épaisseur et 40 millimètres de largeur seront essayés bruts.

Ces divers prélèvements auront une longueur d'environ 50 centimètres.

Mode d'essai. — La barre est chauffée de façon que, sur les 2/3 environ de sa longueur, la température décroisse, en partant de l'extrémité, du jaune au rouge cerise.

L'extrémité la plus chaude est ensuite repliée sur elle-même jusqu'à bloc, sur une longueur aussi courte que possible ; puis la barre est retournée et pliée à bloc une seconde fois en sens inverse aussi près que possible du premier pli ; on fait ainsi quatre plis successifs en retournant la barre à chaque fois, de telle sorte que, l'essai terminé, l'éprouvette présente l'aspect indiqué figure 67.

L'opération se fait en une seule chaude, au marteau à main aidé du marteau à devant ou du pilon. Elle est conduite de telle façon que, les plis successifs étant faits à des températures successivement décroissantes, le dernier soit terminé au rouge sombre (600° environ).

Résultats. — Aucun des quatre plis ainsi effectués ne doit présenter de crique, gerce ou autre défaut.

TOLES EN ACIER DE 8 MILLIMÈTRES A 30 MILLIMÈTRES D'ÉPAISSEUR, POUR CHAUDIÈRES

CHAPITRE I

CONDITIONS GÉNÉRALES

Classification. — Les tôles d'acier de 8 millimètres à 30 millimètres pour chaudières sont classées en deux catégories :

A, pour les pièces ayant à subir un travail d'emboutissage ;

B, pour corps cylindriques, viroles, etc.

Fabrication. — En raison de leur affectation spéciale aux chaudières, les tôles A et B doivent être de première qualité pour l'emploi, en métal sain, homogène, ductile et non fissile.

Elles seront obtenues en laminant des lingots d'acier fabriqués exclusivement au four Martin Siemens à sole basique.

L'emploi dans les charges de fontes phosphoreuses est absolument interdit.

Aspect extérieur. — Laminage. — Les tôles des deux catégories seront parfaitement laminées et cisaillées ; elles présenteront des surfaces planes, unies et propres, sans ondulations, exemptes entièrement de stries, soufflures, gales ou manques de matière, criques, gerçures, gravelures et défauts d'aucune sorte.

Recuit. — Le recuit est obligatoire.

CHAPITRE II

NATURE ET PROPORTION DES ESSAIS

État des tôles à la présentation en recette. — Les tôles seront présentées, après recuit, tracées, mais non cisaillées, avec des excédents de surface offrant des parties saines suffisantes pour permettre tous les prélèvements d'essais.

Le traçage devra être conduit de telle façon qu'après cisaillage les tôles soient complètement affranchies de toutes parties souffleuses provenant de la tête et du pied du lingot et de toute trace de la poche de retassement.

Nature des essais. — Les essais auxquels seront soumises les tôles sont les suivants :

Essais de traction ;

Essais de pliage à froid à l'état de livraison ;

Essais de pliages successifs à chaud.

Il pourra, en outre, être fait un essai pour déterminer la teneur en phosphore, laquelle ne devra pas excéder quatre dix-millièmes (0,04 0/0).

Proportion des essais. — *Essais de traction.* — Un essai par feuille sur une éprouvette découpée dans le sens du laminage ;

Un essai par feuille sur une éprouvette découpée dans le sens perpendiculaire au laminage.

Essais de pliage à froid à l'état de livraison. — Un essai par feuille sur une éprouvette découpée dans le sens perpendiculaire au laminage.

Essais de pliages successifs à chaud. — Un essai par feuille sur une éprouvette découpée dans le sens du laminage.

Détermination de la teneur en phosphore. — Un essai par coulée.

Les proportions d'essais indiquées ci-dessus s'appliquent à toutes les feuilles présentées en réception, quelles que soient leurs surfaces; mais une feuille telle qu'elle est laminée peut, si elle est destinée à fournir plusieurs tôles, être comptée pour une unité dans la proportion des essais, lorsqu'un découpage aux dimensions de commande a lieu seulement après le prélèvement des essais. Dans ce cas, les parties sont marquées et repérées par l'agent de façon à permettre ultérieurement de reconstituer la feuille entière.

CHAPITRE III

PRÉLÈVEMENTS ET PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES

Traçage des prélèvements. — Les prélèvements sont tracés, poinçonnés et repérés sur les indications et par les soins de l'agent réceptionnaire, de préférence près de la partie de la tôle correspondant à la tête du lingot et sur les rives.

La largeur de ces prélèvements comporte, par rapport aux dimensions finies des éprouvettes, des excédents de métal nécessaires pour le travail de finissage et également suffisants pour détruire les actions d'écrouissage quelconques, provoquées par le mode de découpage. D'une façon générale, les bandes de prélèvement devront avoir une largeur supérieure à celle des barreaux d'essais, d'une quantité au moins égale à deux fois leur épaisseur.

Découpage des prises d'essais. — Cette opération doit avoir lieu entièrement à froid, à la machine-outil, par mortaisage, sciage, etc. Les bandes

peuvent être aussi détachées à la tranche, au poinçon ou à la cisaille, en évitant autant que possible, dans ce dernier cas, les déformations dans les découpages successifs.

Dressage. — Les prélèvements déformés, présentant dans leur plus forte ondulation une flèche inférieure à 2 0/0 de la corde, seront redressés à froid ; lorsque la déformation sera plus grande, le redressement pourra se faire à chaud, la température ne devant pas dépasser le rouge sombre.

Finissage. — Le travail de préparation des barreaux ajustés doit avoir lieu ensuite entièrement à froid, au moyen de machines-outils, sans aucune opération ultérieure de martelage, trempe ni recuit. Les faces de laminage seront conservées. Les champs seuls seront travaillés. Les arêtes des barreaux pour essais de pliage seront légèrement adqucies à la lime, sans congé appréciable.

Poinçons de la Compagnie. — Les barreaux d'essais conserveront à chaque tête les poinçons de la Compagnie.

CHAPITRE IV

MODES D'ESSAIS. — RÉSULTATS A OBTENIR

Condition générale. — Les résultats à obtenir, indiqués ci-après dans chaque essai, sont des minima absolus.

Toute épreuve qui ne remplira pas complètement les conditions fixées pourra donner lieu au rebut du lot correspondant.

Essais de traction. — *Prélèvements.* — Deux bandes prélevées l'une dans le sens du laminage, l'autre dans le sens perpendiculaire au laminage.

Forme des éprouvettes. — Les têtes d'attache sont appropriées aux organes de fixation des machines d'essais, leurs formes et dimensions peuvent être considérées comme indifférentes sous la condition de ne pas créer de flexions dans le sens de l'axe de traction : têtes excentrées, non symétriques, etc.

Pour faciliter le travail de mortaisage où de rabotage en paquet par séries d'épaisseurs, toutes les éprouvettes ont une longueur uniforme de 200 millimètres à la partie calibrée.

Repères. — L'écartement entre repères pour le relevé de l'allongement est déterminé, quelle que soit l'épaisseur par la formule $L = \sqrt{66,67S}$.

Ces repères sont croisés à partir de la naissance du congé. La fraction entre ces repères qui servira à calculer l'allongement pour 100 sera celle qui comprendra la section de rupture.

Les éprouvettes seront classées en trois séries dans chacune desquelles la largeur est constante suivant le groupement ci-dessous.

TABLEAU DES DIMENSIONS DES ÉPROUVETTES MÉPLATES POUR LES ÉPAISSEURS DE 8 A 25 MILLIMÈTRES

Largeur uniforme de 30 millimètres

ÉPAISSEUR EN MILLIMÈTRES	SECTION en MILLIMÈTRES CARRÉS	ÉCARTEMENT ENTRE REPÈRES en millimètres	LONGUEUR DE LA PARTIE CALIBRÉE en millimètres
8	240	125	
9	270	135	200
10	300	140	

Largeur uniforme de 25 millimètres

ÉPAISSEUR EN MILLIMÈTRES	SECTION en MILLIMÈTRES CARRÉS	ÉCARTEMENT ENTRE REPÈRES en millimètres	LONGUEUR DE LA PARTIE CALIBRÉE en millimètres
11	275	135	
12	300	140	
13	325	150	
14	350	155	
15	375	160	
16	400	165	200
17	425	170	
18	450	175	
19	475	180	
20	500	185	

Largeur uniforme de 20 millimètres

ÉPAISSEUR EN MILLIMÈTRES	SECTION en MILLIMÈTRES CARRÉS	ÉCARTEMENT ENTRE REPÈRES en millimètres	LONGUEUR DE LA PARTIE CALIBRÉE en millimètres
21	420	170	
22	440		
23	460	175	
24	480	180	
25	500	185	
26	520		200
27	540	190	
28	560	195	
29	580		
30	600	200	

Le rayon de raccordement de la partie calibrée aux têtes aura uniformément 10 millimètres.

Durée de l'essai. — Température. — L'essai a lieu par traction progressive, à la température ambiante. Sa durée, selon le volume du barreau, sera comprise entre une et six minutes.

Résultats. — Les résultats à obtenir sont indiqués au tableau ci-après :

CATÉGORIE des TOLES	ESSAIS DE TRACTION A FROID	
	RÉSISTANCE PAR MILLIMÈTRE CARRÉ de section primitive S	ALLONGEMENT MINIMUM 0/0 mesuré sur une longueur entre repères $\sqrt{66,67S}$
Qualité A..	de 35 à 40 kilogr.	30
Qualité B..	de 40 à 46 —	27

Essai de pliage à froid à l'état de livraison. — *Prélèvements.* — Une bande de 250 millimètres de longueur minima et 40 millimètres de largeur sur toute la partie calibrée prélevée dans le sens perpendiculaire au laminage et autant que possible dans l'axe de la feuille.

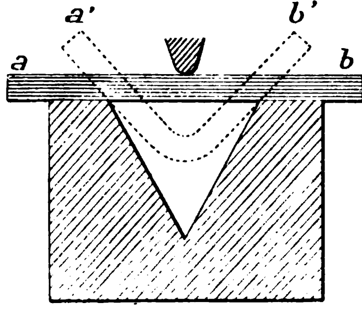


Fig. 74.

Mode d'essai. — L'essai comprend deux opérations distinctes qui se font toutes deux au moyen d'une presse hydraulique, d'un marteau-pilon ou d'un mouton.

1° La bande est placée tout d'abord dans la position *ab* (*fig.* 74) sur un empreint dont les faces obliques forment entre elles un angle d'environ 60°. On applique sur le milieu de la bande un coin ou dégorgeoir arrondi suivant un rayon au plus égal à l'épaisseur de la bande et sur lequel on fait agir la presse, le pilon ou le mouton jusqu'à ce que la bande à essayer ait pris la forme *a'b'* ;

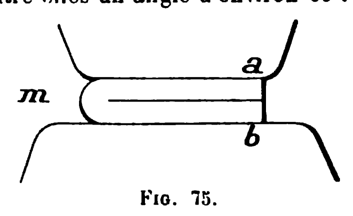


Fig. 75.

2° On enlève ensuite l'empreint et le coin et on achève le pliage à bloc dans les conditions de la figure 75 par le rapprochement des deux branches *am* et *bm* de la bande.

Résultats. — Les bandes prélevées dans les deux qualités de tôle A et B

doivent supporter le pliage à bloc sans présenter après l'essai aucune crique, rupture ou défaut quelconque.

Essai de pliages successifs à chaud. — *Prélèvements.* — Une bande de 50 centimètres de longueur et de 3 à 5 centimètres de largeur découpée dans le sens du laminage.

Mode d'essai. — La bande est chauffée de façon que sur les 2/3 environ de sa longueur sa température décroisse, en partant de l'extrémité, du jaune au rouge cerise.

L'extrémité la plus chaude est ensuite repliée sur elle-même jusqu'à bloc, sur une longueur aussi courte que possible, puis la bande est retournée et pliée à bloc une seconde fois, en sens inverse, aussi près que possible du premier pli ; on fait ainsi quatre plis successifs en retournant la bande à chaque fois, de telle sorte que, l'essai terminé, l'éprouvette présente l'aspect indiqué.

L'opération se fait en une seule chaude, au marteau à main aidé du marteau à devant ou du pilon.

Elle est conduite de telle façon que, les plis successifs étant faits à des températures successivement décroissantes, le dernier soit terminé au rouge sombre (600° environ).

Résultats. — Aucun des quatre plis ainsi effectués ne doit présenter de crique, gerce ou autre défaut.

ESSIEUX EN ACIER FONDU SUR SOLE, BRUTS DE FORGE, ÉBAUCHÉS OU FINIS POUR VOITURES ET WAGONS

CHAPITRE I

CONDITIONS GÉNÉRALES

Classification. — Qualité unique.

Fabrication. — Les essieux proviendront de lingots d'acier fondu de première qualité fabriqués sur sole basique.

L'emploi, dans les charges, de fontes contenant plus de 0,1 0/0 de phosphore, est absolument interdit.

Chaque lingot doit fournir au moins deux essieux.

Les lingots sont, sous un pilon d'au moins 10 tonnes ou sous une presse de puissance convenable, transformés en rondins d'une section au plus égale au 1/5 de leur section moyenne primitive.

Au cours de cette opération, on enlève à la gouge, à chaud, ou au burin, à froid, toutes les criques, pailles, replis et autres défauts superficiels qui peuvent nuire à la qualité et à l'aspect des essieux.

Chaque rondin devra être complètement affranchi de toutes parties soufflleuses provenant de la tête ou du pied du lingot et de toute trace de la poche de retassement.

Les essieux seront, pour les formes et les dimensions, le dégrossissage et le finissage de leurs diverses parties, respectivement conformes aux indications des dessins et des commandes. Les parties destinées à rester brutes seront bien parées; celles indiquées finies sur les dessins seront polies à la plane et à l'émeri.

Le travail de forgeage devra toujours être assez approché pour qu'avant tout travail aux machines-outils les diamètres des diverses parties de l'essieu ne dépassent pas de plus de 15 millimètres les diamètres de l'essieu fini.

Les essieux bruts ou ébauchés seront cintrés avec soin et les centres conservés de manière à permettre la mise ultérieure sur le tour.

Les trous de centrage ou centres des essieux finis après affranchissement des essieux à leur longueur finale devront avoir une profondeur de 15 à 20 millimètres conformément au dessin.

CHAPITRE II

NATURE ET PROPORTION DES ESSAIS

État des essieux à la présentation en recette. — Les essieux seront présentés à la réception, après recuit, groupés par lot comprenant au maximum 50 essieux provenant tous d'une même coulée, mais pouvant être de types différents.

Chaque essieu portera, à l'un et l'autre bout, un excédent de longueur suffisant pour le prélèvement d'une rondelle servant à l'essai de texture défini au chapitre IV.

Nature des essais. — Les essais auxquels seront soumis les essieux sont les suivants :

NATURE DES ESSAIS		PROPORTION DES ESSAIS
Essais au choc	des fusées	Un essieu par lot ; toute fraction de lot pouvant donner lieu à une série d'essais complète, au gré de la Compagnie.
	du corps de l'essieu	
Essais de traction		
Essais de texture		Sur chaque essieu ébauché ou fini.

Il pourra, en outre, être fait un essai chimique, par coulée, pour déterminer la teneur en phosphore, laquelle ne devra pas excéder 0,07 0/0.

L'agent réceptionnaire choisit et poinçonne, dans chaque lot présenté, l'essieu destiné aux essais de choc, traction et chimique.

CHAPITRE III

PRÉLÈVEMENTS ET PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES

Traçage des prélèvements. — En vue des essais de traction, un barreau est prélevé, après les épreuves au choc des fusées et du corps, à la surface de l'essieu, dans sa partie la moins fatiguée.

Ce prélèvement est tracé, poinçonné et repéré sur les indications et par les soins de l'agent réceptionnaire.

Découpage des barreaux. — Cette opération doit avoir lieu entièrement à froid, à la machine-outil, par mortaisage, sciage, etc.

Finissage. — Le travail de préparation des barreaux ajustés doit avoir lieu également à froid, au moyen de machines-outils, sans aucune opération de martelage, trempe ni recuit.

Poinçons de la Compagnie. — Les barreaux d'essai conserveront à chaque tête les poinçons de la Compagnie.

CHAPITRE IV

MODES D'ESSAIS. — RÉSULTATS A OBTENIR

Conditions générales. — Les résultats à obtenir, indiqués ci-après dans chaque essai, sont des minima absolus.

Toute éprouvette qui ne remplira pas complètement les conditions fixées pourra donner lieu au rebut du lot correspondant.

Essais au choc. — *Appareil de choc.* — Les essais au choc des fusées et du corps de l'essieu seront faits à l'aide d'un « mouton » guidé.

Le guidage sera absolument rigide, plan et vertical : il doit être disposé

de telle sorte que le frottement, dans la chute du mouton, soit réduit au minimum.

Le mouton doit être de masse et de forme symétriques par rapport au plan du guidage.

Le centre de gravité du mouton doit être placé le plus bas possible dans le plan du guidage et sur la verticale équidistante des deux guides.

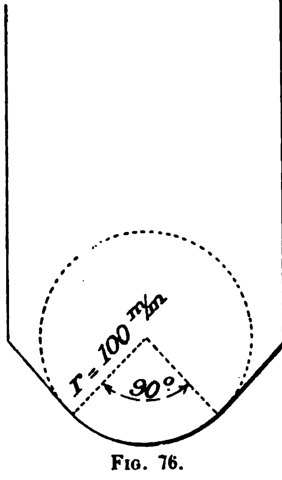


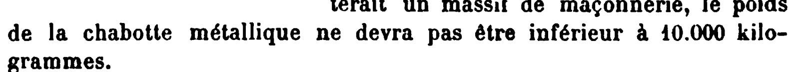
Fig. 76.

La hauteur de la partie guidée du mouton doit être notablement plus grande que l'intervalle entre les guides.

L'appareil à déclic ne doit produire aucun mouvement latéral du mouton lors de sa mise en jeu.

Pour les essais du corps de l'essieu, la panne devra être terminée par une partie cylindrique dont l'axe sera horizontal et dans le plan du guidage : le développement de cette partie cylindrique sera de 90°, et le rayon de 100 millimètres maximum.

La chabotte doit constituer une masse incompressible d'au moins 15 fois la masse du mouton. Dans le cas où elle comporterait un massif de maçonnerie, le poids de la chabotte métallique ne devra pas être inférieur à 10.000 kilogrammes.



Les appuis ou enclumes doivent être fixés à la chabotte.

Essai des fusées. — *Prélèvement.* — L'essieu choisi pour l'essai doit avoir ses portées de calage ébauchées et ses fusées et collets tournés au profil de l'essieu fini.

Mode d'essai. — L'essieu est placé horizontalement sous l'appareil de choc, la naissance de la portée de calage voisine de la fusée à essayer reposant sur un appui fixé à la chabotte, l'autre portée de calage étant maintenue par une masse métallique de 2.000 kilogrammes au maximum.

Le mouton, d'un poids de 500 kilogrammes[1], doit tomber d'aplomb sur le champignon de la fusée.

La fusée sera ainsi soumise à une flexion réalisée par deux chocs successifs du mouton.

L'intensité de l'un et l'autre choc, proportionnée aux dimensions des fusées, sera déterminée par la formule :

$$PH = 0{,}00054D^2L,$$

1. Si ce poids diffère de peu, l'agent réceptionnaire modifiera la hauteur de chute de façon à obtenir le produit kilogrammétrique PH fixé.

dans laquelle :

P, représente le poids du mouton en kilogrammes ;

H, — la hauteur de chute en mètres ;

D, — le diamètre de la fusée en millimètres ;

L, — la longueur de la fusée en millimètres.

L'essieu est ensuite retourné de 180° sur ses appuis et la fusée soumise à un redressement réalisé par deux chocs successifs dont l'intensité résultera de la formule $PH' = 0{,}00060D^2l$ (mêmes notations que ci-dessus).

Résultats. — Les deux fusées de l'essieu doivent pouvoir supporter la flexion et le redressement résultant des chocs définis ci-dessus, sans se rompre ni même se gercer.

Les fusées sont ensuite entaillées à la tranche et rompues pour l'examen des textures qui doivent montrer un grain fin serré, bien homogène avec arrachements et sans aucune trace de défauts.

Essai du corps de l'essieu. — *Mode d'essai.* — Après le tronçonnage des fusées, le corps de l'essieu brut de forge est placé sous l'appareil de choc, sur deux appuis de niveau, espacés exactement de $1^m{,}500$, de façon à recevoir en son milieu le choc d'un mouton de 1.000 kilogrammes.

Pour pouvoir relever, après la première flexion l'allongement pour 100 de la fibre la plus fatiguée par l'essai, l'agent réceptionnaire limitera par des coups de pointeau, suivant la génératrice inférieure du corps de l'essieu, une longueur rigoureuse de $0^m{,}200$ prise moitié à gauche, moitié à droite de l'axe de flexion.

Le corps de l'essieu sera soumis à une première flexion réalisée par deux chocs successifs du mouton.

L'intensité de l'un et l'autre choc, proportionnée aux dimensions de l'essieu au milieu des corps, sera déterminée par la formule $PH = 0{,}35D^2$, dans laquelle :

P représente le poids du mouton en kilogrammes ;

H, la hauteur de chute en mètres ;

D, le diamètre de l'essieu au milieu du corps en millimètres.

L'allongement pour 100 de la fibre la plus fatiguée étant relevé comme il est dit plus haut, l'essieu sera retourné et frappé, dans le sens du redressement, de deux autres chocs dont l'intensité résultera de la formule : $PH' = 0{,}40D^2$ (mêmes notations que ci-dessus).

L'essai est poursuivi en soumettant le corps de l'essieu à un second redressement, réalisés l'un et l'autre par deux chocs successifs de même intensité : $PH' = 0{,}40D^2$.

Résultats. — Le corps de l'essieu doit pouvoir supporter les deux flexions et les deux redressements définis ci-dessus, sans se rompre ni même se gercer.

L'allongement pour 100A, mesuré après la première flexion sur les 200 millimètres pointés moitié à droite, moitié à gauche de l'axe de flexion, devra être compris entre les limites suivantes : $9 \leq A \leq 13$ 0/0.

Essai de traction. — *Prélèvement.* — L'éprouvette, prélevée et obtenue comme il a été dit au chapitre III, sera cylindrique à têtes.

Forme des éprouvettes. — Les têtes d'attache sont appropriées aux organes de fixation des machines d'essai : leurs formes et dimensions peuvent être considérées comme indifférentes, sous la condition de ne pas créer de flexions dans le sens de l'axe de traction : têtes excentrées, non symétriques, etc.

Repères. — L'écartement entre repères pour le relevé de l'allongement est déterminé, quel que soit le diamètre, par la formule $L = \sqrt{66,67S}$ (S étant la section).

Ces repères sont croisés à partir de la naissance du congé. La fraction entre ces repères qui servira à calculer l'allongement pour 100 sera celle qui comprendra la section de rupture.

Dimensions des éprouvettes. — Les dimensions à adopter de préférence sont les suivantes :

Partie calibrée :

Diamètre	$15^{mm},96$
Section	$200^{mm^2},00$
Longueur	$147^{mm},00$
Ecartement entre repères	$115^{mm},00$

Le rayon de raccordement de la partie calibrée aux têtes sera uniformément 10 millimètres.

Durée de l'essai. — *Température.* — L'essai a lieu par traction progressive, à la température ambiante. Sa durée, selon le volume du barreau, sera comprise entre une et six minutes.

Résultats. — Les résultats à obtenir sont indiqués au tableau ci-après :

	RÉSISTANCE MINIMA par MILLIMÈTRE CARRÉ de la section primitive S	ALLONGEMENT MINIMUM 0/0 MESURÉ SUR UNE LONGUEUR entre repères $= \sqrt{66,67S}$
Essieux en acier pour voitures et wagons.	45 kilogr.	25

Essai de texture. — *Prélèvement.* — A l'un et à l'autre bout de chaque essieu ébauché ou fini, une rondelle est prélevée dans la partie formant excédent de longueur.

Ces rondelles sont obtenues par une saignée pratiquée au tour, à distance

convenable et jusqu'à ce que la partie cylindrique concentrique au pourtour de l'essieu conserve un diamètre au moins égal à 45 millimètres.

Mode d'essai. — Elles seront détachées au choc, en présence de l'agent réceptionnaire.

Résultat. — La texture devra présenter un grain fin, sans défaut ni soufflure.

BARRES RONDES EN FER POUR RIVETS, BOULONS ET TIRANTS

CHAPITRE I

CONDITIONS GÉNÉRALES

Classification. — Les barres rondes en fer pour rivets, boulons et tirants comportent trois catégories : R, S, T.

Fabrication. — Les fers des qualités R, S, T seront obtenus par puddlage dit « à fin grain » et avec les meilleurs soins.

CHAPITRE II

NATURE ET PROPORTION DES ESSAIS

Nature des essais. — Les essais auxquels seront soumises les barres sont les suivants :

Essais à froid :

	Catégories.
Épreuve de texture	R, S, T.
— de pliage	R, S, T.
— de traction	R, S, T.

Essais à chaud :

Épreuve de pliages successifs	S, T.

Essais à chaud et à froid :

Épreuve de confection de têtes de rivets	à chaud.	R, S, T.
	à froid..	S, T.

Proportion des essais. — Le nombre de séries d'épreuves à effectuer sur

chaque livraison est proportionné aux tonnages de barres présentées, l'unité de série d'épreuves étant fixée à :

Fer R...........................	2.000 kilogrames.
Fer S et T........................	1.000 —

Toute fraction peut donner lieu à une série complète au gré de la Compagnie.

CHAPITRE III

PRÉLÈVEMENTS ET PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES

Répartition des prélèvements. — Lorsque la réception comportera plusieurs séries d'épreuves, les prélèvements seront autant que possible répartis proportionnellement à l'importance des lots des diverses sections.

Traçage des prélèvements. — Les prélèvements sont tracés, poinçonnés et repérés sur les indications et par les soins de l'agent réceptionnaire.

Préparation des éprouvettes. — Les différentes éprouvettes seront préparées dans les conditions définies au chapitre *Modes d'essais.*

Finissage. — Le travail de préparation des barreaux ajustés doit avoir lieu entièrement à froid, au moyen de machines-outils, sans aucune opération de martelage.

Poinçons de la Compagnie. — Les barreaux d'essai conserveront le poinçon de la Compagnie.

CHAPITRE IV

MODES D'ESSAIS. — RÉSULTATS A OBTENIR

Condition générale. — Les résultats à obtenir, indiqués ci-après dans chaque essai, sont des minima absolus.

Toute épreuve qui ne remplira pas complètement les conditions fixées pourra donner lieu au rebut du lot correspondant.

Essais à froid. — **Épreuve de texture.** — *Prélèvements.* — Sur les diverses catégories de fer.

Mode d'essai. — Les barres entaillées au burin ou à la tranche sont rompues brusquement en porte-à-faux, soit au marteau, soit au pilon.

Résultats. — Pour les fers des trois catégories, cassures saines à nerf, avec tolérance de parties à grain demi-fin pour le fer R, et fin pour les fers S, T.

Épreuve de pliage. — *Prélèvements.* — Sur les diverses catégories de fer.

Pour les fers R et S : morceau brut de 250 millimètres de long. Chauffé au rouge sombre (700) et trempé à l'eau à 38° avec agitation jusqu'au refroidissement.

Mode d'essai. — L'épreuve a lieu sur un empreint à l'aide d'un marteau à devant et d'un dégorgeoir.

Résultats. — Pliage sans crique, à branches formant entre elles un angle de 60° avec rayon intérieur égal : *d* pour le fer R ; à branches parallèles avec écartement intérieur égal à 1/2 *d* pour le fer S ; *d* pour le fer T.

Épreuve de traction. — *Prélèvements* (sur les diverses catégories de fer). — Le barreau sera essayé brut ou terminé à froid au tour.

Forme des éprouvettes. — Les têtes d'attache sont appropriées aux organes de fixation des machines d'essais ; leurs formes et dimensions peuvent être considérées comme indifférentes, sous la condition de ne pas créer de flexions dans le sens de l'axe de traction : têtes concentrées, non symétriques, etc.

Repères. — L'écartement entre repères, pour le relevé de l'allongement, est déterminé par la formule $L = \sqrt{66,67S}$ (S étant la section). Ces repères sont croisés à partir de la naissance des congés. La fraction entre ces repères qui servira à calculer l'allongement pour 100 sera celle comprenant la section de rupture.

Dimensions des éprouvettes. — Des ronds de 25 millimètres de diamètre et au dessous peuvent être essayés bruts si le fournisseur le désire, les extrémités généralement prises entre coins striés. Pour les barres de diamètres supérieurs à 25 millimètres, l'éprouvette sera cylindrique avec longueur calibrée façonnée au tour et extrémités généralement prises entre coins striés.

L'éprouvette type à prendre de préférence en ce dernier cas est la suivante :

Diamètre	22mm,57
Section	400 millimètres carrés
Écartement entre repères.....	165mm,00
Longueur de la partie calibrée.	210mm,00

Durée de l'essai. — *Température.* — L'essai a lieu par traction progressive à la température ambiante.

La durée selon le volume du barreau sera comprise entre une à six minutes.

Résultats. — Les résultats à obtenir sont indiqués au tableau ci-après.

CATÉGORIES	ESSAIS A FROID	
	RÉSISTANCE MINIMUM par millimètre carré de section primitive S	ALLONGEMENT MINIMUM 0/0 mesuré sur une longueur entre repères $\sqrt{66,67S}$
R	32 kilogr.	12
S	35 —	25
T	38 —	24

Essai à chaud. — Épreuves de pliages successifs. — *Prélèvements.* — Sur les échantillons des fers S et T dont $d \geqslant 5$ millimètres.

Les échantillons de diamètres supérieurs à 15 millimètres seront préalablement réduits par laminage ou forgeage à un diamètre de 15 millimètres.

Ceux n'ayant pas plus de 15 millimètres de diamètre seront essayés bruts.

Mode d'essai. — Le morceau, d'une longueur de 50 centimètres environ, est chauffé de façon que, sur les 2/3 environ de sa longueur, sa température décroisse, en partant de l'extrémité, du jaune au rouge cerise. L'extrémité la plus chaude est ensuite repliée sur elle-même jusqu'à bloc sur une longueur aussi courte que possible, puis la barre est retournée et pliée à bloc une seconde fois, en sens inverse, aussi près que possible du premier pli ; on fait ainsi quatre plis successifs en retournant la barre à chaque fois, de telle sorte que, l'essai terminé, l'éprouvette présente l'aspect indiqué par le croquis (*fig.* 67). L'opération se fait en une seule chaude au marteau à main aidé du marteau à devant et à pilon.

Elle est conduite de telle façon que, les plis successifs étant faits à des températures successivement décroissantes, le dernier soit terminé au rouge sombre (600° environ).

Résultats. — Aucun des quatre plis ainsi effectués ne doit présenter de crique, gerce ou autre défaut.

Essais à chaud et à froid. — Épreuve de confection de têtes de rivets. — *Prélèvements.* — Morceaux bruts d'environ 150 millimètres de longueur.

MODE D'ESSAI. — Confection de quatre têtes de rivets, dont deux à chaud et deux à froid par série d'essais.

A chaud (sur toutes les catégories des fers). — En une seule chaude. Le morceau d'essai est chauffé à l'un des bouts, puis refoulé et bouterollé, de façon à produire une tête de rivet sensiblement circulaire, d'un dia-

mètre D égal à 2 fois et demie le diamètre *d* de la barre essayée et d'une hauteur H égale à la moitié de ce même diamètre *d*.

A froid (sur les fers des catégories S et T seulement). — L'extrémité du morceau est rivée en goutte de suif ou marteau à main et à petit coup de façon à donner à la tête les dimensions D, H ci-après.

	D Minimum	H Maxima
Pour les barres de diamètre $d \leq 22^{mm}$.	1,5 *d*	1/2 *d*
— — $d > 22^{mm}$.	$11^{mm} + d$	1/2 *d*

Résultats. — Ces têtes de rivets dans l'une et l'autre épreuve doivent être obtenues sans gerçure, crique ou autre défaut.

CORPS DE ROUES A CENTRES PLEINS SANS NERVURES EN FER OU EN ACIER

CHAPITRE I

CONDITIONS GÉNÉRALES

Classification. — La présente spécification s'applique aux corps de roues à centres pleins sans nervures en fer ou en acier, forgés ou laminés, bruts, ébauchés ou finis, suivant les indications de la commande.

Ces corps de roues peuvent être :

1° A toile plane ;

2° A toile ondulée.

Fabrication. — Les corps de roues en acier seront obtenus par le forgeage ou le laminage de pièces en acier moulé, exemptes de soufflures ou retassures et provenant du traitement, sur sole ou au convertisseur, de matières de bonne qualité. Le métal des corps de roues devra se laisser attaquer facilement au burin.

Recuit. — Les corps des roues en acier seront recuits.

Aspect extérieur. — Les parties qui doivent rester brutes seront parfaitement parées, sans bavure, ni trace de jonction de matrice ; la jante sera régulière. Les parties déformées par le retrait ou le recuit seront convenablement dégauchies.

Les corps de roues devront être exempts de criques et fissures ; les pailles, gerçures et autres défauts devront être sans importance au point de vue de l'emploi.

La Compagnie est juge de l'acceptation ou du rebut des pièces présentant ces défauts.

CHAPITRE II

NATURE ET PROPORTION DES ESSAIS

Nature des essais. — Les essais auxquels sont soumis les corps de roues sont les suivants :

Sur les pièces elles-mêmes :

Essai de résistance (défonçage et mandrinage) ;

Épreuve d'équilibrage.

Il pourra, en outre, être fait un essai pour déterminer, sur les corps de roues en acier seulement, la teneur en phosphore, laquelle ne devra pas excéder 0,07 0/0.

Proportion des essais. — La proportion des essais est la suivante :

Essai de défonçage et de mandrinage : 1 par 100 pièces ;

Équilibrage : individuellement pour les roues à livrer finies et ébauchées, 1 par 50 pour les roues à livrer brutes ;

Teneur en phosphore (corps de roues en acier), 1 par coulée.

Toute fraction de lot peut donner lieu à une série complète d'essais au gré de la Compagnie.

CHAPITRE III

PRÉLÈVEMENTS ET PRÉPARATION DES ESSAIS

Préparation des corps de roues d'essais. — Les corps de roues choisis pour les essais de défonçage et de mandrinage du moyeu auront la jante et la hauteur du moyeu dégrossies à 2 millimètres près de la cote et le moyeu alésé à la cote finie. Par raison d'économie, les corps de roues choisis pour ces essais seront pris, de préférence, parmi ceux présentant quelque défaut de forme de nature à les rendre impropres au service.

Poinçons de la Compagnie. — Les corps de roues d'essais conserveront les poinçons de la Compagnie.

CHAPITRE IV

MODES D'ESSAI. — RÉSULTATS A OBTENIR

Condition générale. — Les résultats à obtenir indiqués ci-après, dans chaque essai, sont des minima absolus.

Toute épreuve qui ne remplira par les conditions fixées pourra donner lieu au rebut du lot correspondant.

Essai sur les pièces. — *Défonçage du moyeu.* — Le corps de roue dégrossi et alésé étant posé à plat de telle manière que la jante soit appuyée sur une couronne et soit seule soutenue, le moyeu sera déformé par des chocs ou à la presse, jusqu'à ce que le plan de sa face supérieure se soit abaissé d'une hauteur égale à 2 0/0 du diamètre à la jante, s'il s'agit d'un corps de roue en fer, ou à 4 0/0 s'il s'agit d'un corps de roue en acier.

Résultats. — Il ne devra se manifester, au cours de cet essai, aucune crique, gerçure, ni indice de rupture.

Après ce premier essai, on détachera le moyeu de la toile qui le relie à la jante, en rompant cette toile, soit au pilon, soit à la presse, ou en employant tout autre procédé si la rupture ne peut être obtenue ainsi.

Les cassures devront présenter l'apparence d'un métal de bonne qualité.

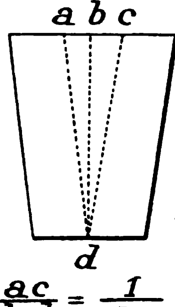


FIG. 77.

Mandrinage du moyeu. — Dans le moyeu détaché, comme il est dit plus haut, on introduira successivement, par le côté de la grande saillie lorsque le type en comporte, des poinçons d'une conicité de 1/100 que l'on enfoncera jusqu'à ce que le diamètre intérieur du moyeu, mesuré du côté de l'entrée des poinçons, soit agrandi de 3 0/0, s'il s'agit d'un corps de roue en fer, ou de 5 0/0 s'il s'agit d'un corps de roue en acier.

Résultats. — Il ne devra se manifester, au cours de cet essai, ni crique, ni gerçure, ni indice de rupture.

L'essai sera ensuite continué jusqu'à rupture, et les cassures devront présenter l'apparence d'un métal de bonne qualité.

Épreuve d'équilibrage. — *Prélèvements.* — Si la commande porte que les roues sont à livrer brutes, 1 roue sur 50 sera tournée et alésée pour subir l'essai.

Mode d'essai. — *Résultats.* — Le balourd, mesuré à l'extrémité d'un rayon de $0^m,500$, ne devra pas dépasser 250 grammes.

CORPS DE ROUES A RAYONS OU A TOILE AVEC NERVURES EN FER OU EN ACIER SOUDÉ

CHAPITRE I

CONDITIONS GÉNÉRALES

Classification. — La présente spécification s'applique aux corps de roues à rayons ou à toiles avec nervures, en fer ou en acier soudé bruts, ébauchés ou finis, suivant les indications de la commande.

Ces corps de roues peuvent être :

1° A rayons simples ;

2° A rayons doubles formés de bandes laminées ;

3° A toile avec nervures.

Fabrication. — Les corps de roues seront parfaitement soudés. Les soudures en coin des rais entre eux devront être suffisamment étendues et chargées pour ne laisser aucun manque de matière après tournage.

Tout encolletage direct de rondelles isolées, posé à plat pour former des saillies, est rigoureusement interdit.

Recuit. — Les corps de roues en acier devront être recuits.

Aspect extérieur. — Les parties brutes seront parfaitement parées sans bavures, ni traces de jonction de matrice. La jante sera régulière. Les parties déformées par le retrait ou le recuit seront convenablement dégauchies.

CHAPITRE II

NATURE ET PROPORTIONS DES ESSAIS

Nature des essais. — Les essais sont les suivants :

Sur le métal devant servir à la confection des roues : *Essai de soudabilité trempe, pliage (pour l'acier seulement)*;

Sur les pièces elles-mêmes : *Essai de résistance (défonçage et mandrinage)*;

Épreuve d'*équilibrage*.

Proportion des essais. — La proportion des essais est la suivante :

Soudabilité : 1 essai par livraison ou par 100 corps de roues.

Essai de défonçage et mandrinage : 1 essai par 100 pièces.

Équilibrage (pour les roues simples seulement) : individuellement pour les roues à livrer finies ou ébauchées ;

1 par 50 pour les roues à livrer brutes.

Toute fraction de lot peut donner lieu à une série complète d'essais, au gré de la Compagnie.

CHAPITRE III

PRÉLÈVEMENTS ET PRÉPARATION DES ESSAIS

Prélèvements. — Les barreaux d'essais seront prélevés dans les matières devant servir à la confection des corps de roues en acier soudé seulement.

Découpage. — Finissage. — Les barreaux sont découpés à froid et ne subissent d'autre travail que le découpage à la machine-outil et le tournage, s'il y a lieu.

Les prélèvements déformés, présentant dans leur plus forte ondulation une flèche inférieure à 2 0/0 de la corde, seront redressés à froid : lorsque la déformation sera plus grande, le redressement pourra se faire à chaud en présence de l'agent réceptionnaire, la température ne devant pas dépasser le rouge sombre.

Préparation des corps de roues d'essais. — Les corps de roues choisis pour les essais de défonçage et de mandrinage du moyeu auront la jante et la hauteur du moyeu dégrossies à 2 millimètres près de la cote finie et le moyeu alésé à la cote finie. Par raison d'économie, les corps de roues choisis pour ces essais seront pris, de préférence, parmi ceux présentant quelque défaut de forme, de nature à les rendre impropres au service.

Poinçons de la Compagnie. — Les corps de roues et barreaux d'essais conserveront les poinçons de la Compagnie.

CHAPITRE IV

MODES D'ESSAIS. — RÉSULTATS A OBTENIR

Condition générale. — Les résultats à obtenir indiqués ci-après dans chaque essai sont des minima absolus.

Toute épreuve qui ne remplira pas complètement les conditions fixées pourra donner lieu au rebut du lot correspondant.

Épreuve de soudabilité, trempe et pliage. — *Prélèvements* (sur le métal devant servir à la confection des corps de roues en acier soudé seulement). — Les prélèvements auront de 15 à 25 millimètres d'épaisseur et 40 millimètres de largeur, sur 250 millimètres de longueur environ.

Mode d'essai de soudure. — L'éprouvette sera rompue en son milieu en deux parties, puis soudée et forgée. Les deux parties doivent être réunies bout à bout par une soudure dite par amorces et à chaude portée.

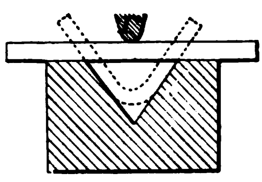


Fig. 78.

Chaque amorce à forme convexe, inclinée à 45°, présentera une surface de soudure du double environ de la section droite primitive du barreau.

La soudure devra être obtenue au moyen de deux chaudes, l'une chaude suante, l'autre chaude de ressuée.

L'éprouvette sera ensuite convenablement parée.

Mode de trempe et de pliage. — Les barreaux sont chauffés au rouge cerise un peu sombre (700°) et trempés à l'eau à 28°, le volume d'eau étant considérable par rapport à celui de l'éprouvette. Après refroidissement, les barreaux seront pliés sur un empreint (*fig.* 78), au moyen d'un coin ou dégorgeoir arrondi suivant un rayon *r* au plus égal à l'épaisseur du barreau.

On admettra tout autre dispositif permettant de plier la barrette à l'angle voulu, sur un mandrin présentant le rayon *r* indiqué plus haut.

Les barreaux sont pliés sur le plat de la soudure jusqu'au parallélisme des deux branches avec un écartement intérieur égal à leur épaisseur x (*fig.* 79).

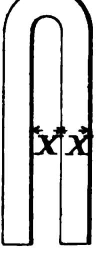


Fig. 79.

Résultats. — Ces pliages doivent être obtenus sans décollement, rupture ou défaut.

Pour s'assurer, en outre, de la perfection de la soudure, on ouvrira et on fermera alternativement l'angle de pliage, afin de provoquer la rupture qui devra être entièrement saine, sans parties dessoudées.

Essai sur les pièces. — *Défonçage du moyeu.* — Le corps de roue dégrossi et alésé étant placé à plat de telle manière que la jante soit appuyée sur une couronne et soit seule soutenue, le moyeu sera déformé par des chocs, ou à la presse, jusqu'à ce que le plan de sa face supérieure se soit abaissé d'une hauteur égale à 1 0/0 du diamètre à la jante pour les corps de roues à rayons et à 1,5 0/0 pour les corps de roues à toile nervurée.

Résultats. — Il ne devra se manifester, au cours de cet essai, aucune crique, gerçure ni indice de rupture. On ne tiendra pas compte toutefois des criques, gerçures ou indices de rupture qui se produiraient sur des bras ou nervures n'aboutissant pas au moyeu.

Après ce premier essai, on détachera le moyeu des bras, nervures ou

toile qui le relient à la jante, en les rompant, soit au pilon, soit à la presse, ou en employant tout autre procédé si la rupture ne peut être obtenue ainsi.

Les cassures doivent présenter l'apparence d'un métal de bonne qualité.

Mandrinage du moyeu. — Dans le moyeu détaché comme il est dit plus haut, on introduira successivement par le côté de la grande saillie, lorsque le type en comporte, des poinçons d'une conicité de 1/100 que l'on enfoncera jusqu'à ce que le diamètre intérieur du moyeu, mesuré du côté de l'entrée des poinçons, soit agrandi de 3 0/0 (*fig.* 77).

Résultats. — Il ne devra se manifester, au cours de cet essai, ni crique, ni gerçure, ni indice de rupture.

L'essai sera ensuite continué jusqu'à rupture, et les cassures devront présenter l'apparence d'un métal de bonne qualité.

Épreuve d'équilibrage. — *Prélèvements* (pour les roues simples seulement). — Si la commande porte que les roues sont à livrer brutes, 1 roue sur 50 sera tournée pour subir l'essai.

Mode d'essai. — *Résultats.* — Le balourd mesuré à l'extrémité d'un rayon de $0^m,500$ ne devra pas dépasser 250 grammes.

BARRES D'ACIERS A RESSORTS

CHAPITRE I

CONDITIONS GÉNÉRALES

Classification. — Les barres d'acier destinées à la fabrication des ressorts sont, au point de vue de la qualité, classées en quatre catégories désignées par les lettres A, B, C, D.

Fabrication. — Les barres pour ressorts seront en acier fondu au creuset ou en acier fondu au four Martin.

L'emploi, dans les charges, de fontes contenant plus de 0,1 0/0 de phosphore, est absolument interdit.

Aspect. — Les barres seront laminées avec le plus grand soin ; leurs surfaces seront lisses, sans criques, pailles, bavures, manque de matière ou défaut quelconque susceptible de nuire à leur résistance et à leur aspect.

Les sections des barres laminées seront conformes pour la forme et les dimensions aux indications des dessins.

Les barres présenteront une largeur et une épaisseur parfaitement uniformes. Aucun bombement ne sera admis sur la largeur, mais on pourra tolérer une concavité indiquée ci-après.

Les nervures et rainures, si le type en comporte, seront profilées exactement et situées bien au milieu de la largeur.

Dressage. — Les barres seront bien dressées à plat et sur champ.

Affranchissement des bouts. — Les bouts des barres seront cisaillés franchement et non égrenés.

Calibrage du profil. — Les profils, les dimensions, la position des nervures et rainures, ainsi que les concavités des faces, seront vérifiés aux calibres, ou de toute autre manière suffisamment précise.

CHAPITRE II

NATURE ET PROPORTION DES ESSAIS

État des barres à la présentation en recette. — Les barres de chaque coulée seront présentées séparément, groupées par échantillons différents.

Nature et proportion des essais. — Les essais auxquels sont soumises les barres sont les suivants :

NATURE DES ESSAIS	CATÉGORIES	PROPORTION DES ESSAIS
Essais de flexion et de flexibilité. Essais de contre-flexion. Essais de choc. — Lames tremp. et recuites dans les mêmes conditions que les lames à ress.	A, B, C, D.	Deux séries d'essais par coulée ou par lot de 100 barres.
Essais de pliage sur trous		Un essai par coulée ou par lot de 100 barres.

On choisira, si possible, dans chaque coulée, des barres de sections différentes. Il pourra, en outre, être fait un essai pour déterminer la teneur en phosphore, laquelle ne devra pas excéder six dix-millièmes (0,06 0/0).

CHAPITRE III

PRÉLÈVEMENT ET PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES

Traçage des prélèvements. — Les prélèvements sont tracés, poinçonnés et repérés sur les indications et par les soins de l'agent réceptionnaire.

Cisaillage des prélèvements. — Les prélèvements d'essais sont effectués par cisaillage. Si, pendant cette opération, des éclats, fentes ou criques imputables à un défaut de fabrication de l'acier se produisent, toutes les barres de la coulée correspondante pourront être refusées.

Poinçons de la Compagnie. — Les prélèvements d'essais conserveront les poinçons de la Compagnie.

CHAPITRE IV

MODES D'ESSAI. — RÉSULTATS A OBTENIR

Condition générale. — Les résultats à obtenir indiqués ci-après dans chaque essai sont des minima absolus. Toute épreuve qui ne remplira pas complètement les conditions fixées pourra donner lieu au rebut du lot correspondant.

Essai de flexion. — *Prélèvements.* — Chaque lame d'essai aura une longueur de 1.030 millimètres (Voir *fig.* 80) et sera coupée d'équerre 85.

Préparation de la lame. — La lame sera cintrée à chaud de manière à présenter une flèche supérieure de 40 millimètres au plus à la flèche f correspondant à l'allongement élastique demandé.

Dans le cas de barres rainées, la nervure devra se trouver sur la face convexe.

La flèche f, exprimée en millimètres, aura été calculée *a priori* au moyen de la formule

$$f = \frac{iL^2}{6h},$$

dans laquelle : i représente l'allongement élastique qui est fixé :

Pour l'acier	A, à............	0,006
—	B, à............	0,007
—	C, à............	0,0075
—	D, à............	0,008

L, la longueur totale de la lame exprimée en millimètres et égale à 1.030;

Et h, son épaisseur réelle exprimée en millimètres, laquelle peut différer de l'épaisseur h_0 prévue à la commande, pourvu qu'elle reste dans les limites indiquées à l'article *Tolérances*.

Aussitôt après cintrage, la lame sera trempée et recuite, puis dégauchie, s'il y a lieu, en profitant de la chaleur que lui a laissée le recuit. Après cette préparation, la lame devra encore présenter une flèche supérieure d'au moins 10 millimètres à la flèche f.

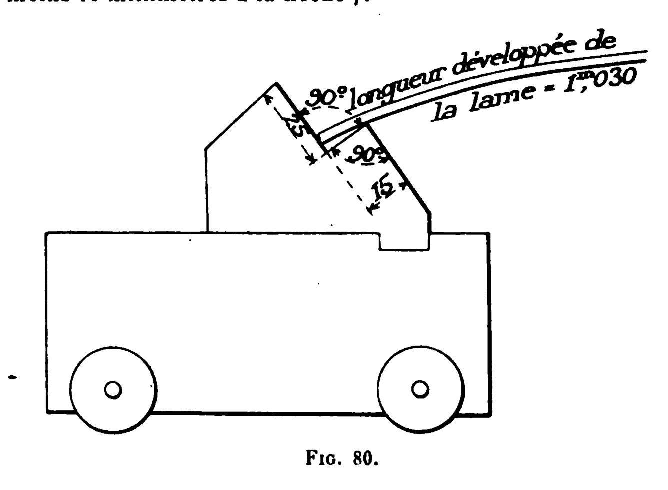


Fig. 80.

Ces opérations ont lieu dans les conditions de fabrication du ressort monté et d'après les procédés adoptés par l'usine.

Flexion préalable. — La convexité étant tournée vers le haut, on fera reposer la lame sur deux couteaux disposés suivant le croquis ci-contre et portés par des chariots entièrement libres; puis on la soumettra, en son milieu, à une charge préalable provoquant une flexion f calculée comme il est dit plus haut. La lame ayant été ainsi laissée en tension pendant cinq minutes, on la déchargera et on mesurera la flèche conservée qui sera prise comme flèche d'origine.

Épreuve de flexion proprement dite. — Après cette préparation, la lame reposant toujours sur les deux appuis sera graduellement chargée, à une vitesse uniforme d'environ 500 kilogrammes à la minute, sans arrêt ni suppression de charge jusqu'à la flexion :

$$f_0 = \frac{iL^2_0}{6h},$$

dans laquelle : i est, comme il a été dit plus haut, l'allongement élastique fixé pour la catégorie d'acier considérée ;

L_0, la longueur de lame soumise à l'essai exprimée en millimètres et égale à 1.000 ;

h, l'épaisseur réelle de la lame exprimée en millimètres, laquelle peut différer de l'épaisseur h_0 prévue à la commande, pourvu qu'elle reste dans les limites indiquées dans l'article *Tolérances.*

La charge P_0. correspondant à la flexion f_0 ci-dessus, sera maintenue pendant une minute, puis enlevée, et la lame devra alors reprendre exactement sa flèche d'origine.

Si cette condition est satisfaite, l'épreuve sera continuée en augmentant la charge P_0 ci-dessus, de quantités successivement décroissantes (50 en 50 kilogrammes, 25 en 25 kilogrammes) ; mais on enlèvera chaque fois la charge, afin de pouvoir mesurer la flèche et saisir le moment où une perte de flèche permanente commencera à se produire.

La limite d'élasticité sera considérée comme atteinte lorsque cette perte de flèche sera au moins égale à $0^{mm},5$.

Allongement élastique. — L'allongement élastique i_1 sera calculé au moyen de la formule

$$i_1 = \frac{6 f_1 h}{L^2_0},$$

dans laquelle on prendra pour f_1 la valeur de la flexion produite par la charge P_1 précédant immédiatement celle qui a produit une perte de flèche permanente de $0^{mm},5$.

On devra trouver ainsi, pour l'allongement élastique, des valeurs i_1 au moins égales :

Pour l'acier	A, à............	0,006
—	B, à............	0,007
—	C, à............	0,0075
—	D, à............	0,008

Flexibilité. — La flexibilité $\frac{f^1}{P1}$ doit d'ailleurs avoir, à ± 8 0/0 près, une valeur égale à $\frac{L^3_0}{4Eb_0h^3_0}$, expression dans laquelle :

L_0 est la longueur de lame soumise à l'essai, exprimée en millimètres et égale à 1.000 ;

E est 20.000 ;

b_0 et h_0 sont la largeur et l'épaisseur de la lame, exprimées en millimètres, telles qu'elles sont prévues à la commande et dont les dimensions réelles peuvent différer, pourvu qu'elles restent dans les limites indiquées à l'article *Tolérances.*

Essai de contre-flexion. — *Mode d'essai.* — L'essai sera poursuivi au moyen de charges progressives différant entre elles de quantités décrois-

santes, jusqu'à ce que la flexion totale ait atteint 3/2 de la flèche de fabrication.

Résultats. — Cette flexion devra être atteinte sans que la rupture se produise.

Essai de choc. — *Prélèvements.* — Sur la barre choisie pour essai, on prélèvera une barrette de 200 millimètres de longueur, qui restera droite et qui sera trempée et recuite dans les mêmes conditions que la lame ayant servi à l'essai de flexion.

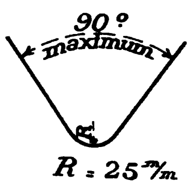


Fig. 81.

Mode d'essai. — Cette barrette, placée horizontalement sur deux appuis distants de 100 millimètres et reposant eux-mêmes sur une chabotte non élastique, sera soumise en son milieu aux chocs d'un mouton guidé pesant 50 kilogrammes. La panne de ce mouton sera en acier trempé et recuit; elle aura la forme du croquis ci-contre. La hauteur de chute H sera déterminée en centimètres à l'aide de la formule

$$H = \frac{S}{4},$$

dans laquelle S représente la section de la barrette en millimètres carrés. On pourra tolérer l'emploi d'un mouton d'un poids Q un peu différent de 50 kilogrammes, à condition que sa hauteur de chute H′ soit déterminée par la formule:

$$QH' = 50H.$$

Résultats. — La barrette doit résister sans crique ni rupture:

Pour l'acier	A, à.........	2	chocs
—	B, à.........	2	—
—	C, à.........	2	—
—	D, à.........	6	—

L'essai sera poursuivi jusqu'à rupture, en notant le nombre de coups que la barrette aura supportés.

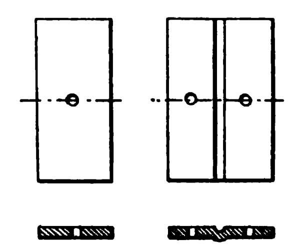


Fig. 82 et 83.

Essais de pliage sur trous. — *Prélèvements* (sur l'acier D seulement). — Morceau de 200 millimètres de longueur percé à la mèche de 1 trou (acier plat) ou 2 trous (acier rainé) de 10 millimètres de diamètre, chauffé à une température atteignant au moins le jaune orange, trempé à l'eau à 20° et recuit.

Mode d'essai. — Le morceau, après refroidissement, est plié transversalement à l'endroit des trous jusqu'à l'apparition de criques.

Résultats. — Les criques doivent montrer une texture claire, sans défauts.

Des textures bleues ou noires indiquent que le métal s'est tapé à la trempe ou au recuit et sont une cause de rebut.

PIÈCES EN ACIER MOULÉ

CHAPITRE I

CONDITIONS GÉNÉRALES

Classification. — Les pièces en acier moulé sont, au point de vue de la qualité, classées en cinq catégories: M1, M2, M3, M4 et M5.

Fabrication. — L'acier employé à la fabrication sera obtenu au creuset au four Martin ou au convertisseur, selon les indications des commandes.

Les commandes indiqueront également les pièces pour lesquelles l'emploi de fontes phosphoreuses dans les charges est absolument interdit.

Aspect extérieur. — Les pièces devront être exemptes de dartres, gouttes froides, criques, tapures ou autres défauts pouvant nuire à leur solidité ou à leur emploi.

Recuit. — Les pièces seront recuites avec soin. Tout autre traitement thermique devra être spécialement autorisé par la Compagnie.

CHAPITRE II

NATURE ET PROPORTION DES ESSAIS

État des pièces à la présentation. — Les pièces seront présentées soigneusement nettoyées et ébarbées au burin et à la lime. Elles devront être livrées sans aucune peinture même à la plombagine ou à la poudre d'ardoise.

Nature des essais. — Les essais auxquels seront soumises les pièces en acier moulé sont les suivants :

I. *Sur éprouvettes :*

	Catégories
Épreuve de traction................	M1, M2, M3, M4, M5
— par choc..................	M1, M3, M4

II. *Sur pièces :*

Épreuve de burinage...............	M1, M2, M3, M4, M5

— de choc
— d'étanchéité } des boîtes à huile.
— à la pression de certaines pièces spéciales.

Proportion des essais. — Le nombre de séries d'épreuves à effectuer sur chaque livraison et par chaque catégorie ou qualité est proportionné aux tonnages des pièces présentées, l'unité de série d'épreuves étant appliquée à 1.000 kilogrammes.

Pour les boîtes à huile, la proportion des essais au choc est fixée à 1 sur 100 pièces ; l'épreuve d'étanchéité est individuelle.

L'épreuve à la pression a lieu sur toutes les pièces pour lesquelles elle est demandée par les dessins ou par les commandes.

Toute fraction peut donner lieu à une série complète d'essais, au gré de la Compagnie.

Il doit être entendu que chaque coulée sera essayée, mais sans que le tonnage d'aucune d'elles puisse donner lieu à plus de deux séries d'épreuves.

La Compagnie se réserve, en outre, le droit d'augmenter la proportion des essais pour certaines pièces importantes.

Dans ce cas, les dessins indiqueront la place et le nombre des appendices attenants que la pièce devra porter.

CHAPITRE III

PRÉLÈVEMENTS ET PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES

Répartition des prélèvements. — Les épreuves seront faites, chaque fois qu'il sera possible, sur des barreaux découpés dans des appendices attenant aux pièces.

Lorsque la forme ou l'exiguité des pièces ne permettra pas de faire venir de fonte les appendices y attenant, des lingots d'essais seront coulés en châssis séparés en même temps que les pièces et repérés, en présence de l'agent de la Compagnie, au numéro de coulée correspondant.

Les lingots d'essais coulés en châssis séparés pourront être surmontés d'une masselotte ne dépassant pas 200 millimètres de hauteur.

Ils seront traités dans les mêmes conditions que les pièces.

Les pièces à munir de prélèvements ou les lingots d'essais à couler séparément sont désignés par la Compagnie.

Traçage des prélèvements. — Les prélèvements sont détachés, tracés, poinçonnés et repérés sur les indications et par les soins de l'agent réceptionnaire.

Préparation des éprouvettes. — **Finissage.** — Le travail de préparation des barreaux ajustés doit avoir lieu entièrement à froid, au moyen de machines-outils, sans aucune opération de martelage, trempe, ni recuit.

Les arêtes des barreaux pour essais de choc seront légèrement adoucies à la lime, sans congé appréciable.

Poinçons de la Compagnie. — Les barreaux d'essais conserveront les poinçons de la Compagnie.

CHAPITRE IV

MODES D'ESSAIS. — RÉSULTATS A OBTENIR

Condition générale. — Les résultats à obtenir indiqués ci-après dans chaque essai sont des minima absolus.

Toute épreuve qui ne remplira pas complètement les conditions fixées pourra donner lieu au rebut du lot correspondant.

1° SUR ÉPROUVETTES. — **Épreuve de traction.** — *Prélèvements.* — Sur les cinq catégories d'aciers.

Forme des éprouvettes. — Les têtes d'attaches sont appropriées aux organes de fixation des machines d'essais ; leurs formes et dimensions peuvent être considérées comme indifférentes sous la condition de ne pas créer de flexions dans le sens de l'axe de traction : têtes excentrées, non symétriques, etc.

Dans les éprouvettes cylindriques, les extrémités peuvent être prises entre coins striés.

Repères. — L'écartement entre repères, pour le relevé de l'allongement, est déterminé par la formule $L = \sqrt{66,67S}$ (S étant la section).

Ces repères sont croisés à partir de la naissance des congés. La fraction entre ces repères qui servira à calculer l'allongement pour 100 sera celle comprenant la section de rupture.

DIMENSIONS DES ÉPROUVETTES. — *Éprouvettes cylindriques.* — Pas plus de 25 millimètres de diamètre.

Les dimensions à adopter de préférence sont les suivantes :

Diamètre	$13^{mm},82$
Section	150 millimètres carrés
Écartement entre repères	100 millimètres
Longueur de la partie calibrée	130 millimètres environ
Rayon de raccordement de la partie calibrée aux têtes	2 millimètres minimum

Durée de l'essai. — *Température.* — L'essai a lieu par traction progressive, à la température ambiante. — La durée, selon le volume du barreau, sera comprise entre une et six minutes.

Résultats. — Les résultats à obtenir sont indiqués au tableau ci-après.

CATÉGORIES	ESSAIS DE TRACTION A FROID		
	LIMITE MINIMUM des allongements proportionnels par millimètre carré de section primitive S	RÉSISTANCE MINIMUM par millimètre carré de section primitive S	ALLONGEMENT MINIMUM 0/0 mesuré sur une longueur entre repères $L = \sqrt{66,67S}$
M1	»	40 kilogr.	20
M2	»	45 —	10
M3	»	45 —	15
M4	30 kilogr.	45 —	15
M5	»	60	12

Épreuve par choc. — *Prélèvements.* — Sur les trois catégories M1, M2 et M4.

Dimensions. — Les barreaux d'essais seront ramenés par finissage à une section carrée de 30 millimètres de côté et à une longueur d'environ 200 millimètres.

Mode d'essai. — Chaque barreau placé horizontalement sur deux couteaux espacés de 160 millimètres d'axe en axe et fixés sur une enclume pesant au moins 500 kilogrammes devra supporter le choc d'un mouton du poids de 50 kilogrammes tombant librement d'une hauteur constante de 3 mètres, au milieu de l'intervalle des points d'appui.

La panne du mouton sera terminée par une partie cylindrique à rayon de 15 millimètres environ sur un développement de 90°.

Après avoir supporté un premier choc, le barreau sera retourné sens

dessus dessous et recevra deux chocs consécutifs, puis alternativement deux chocs dans chaque sens jusqu'à rupture.

Résultats. — Les barreaux doivent pouvoir supporter avant crique ou rupture les nombres de chocs ci-après, en comptant les chocs de redressement :

Catégorie	M1	3 chocs
—	M3	2 —
—	M4	12 —

Pour se renseigner, en outre, sur la qualité du métal, l'essai sera toujours poursuivi jusqu'à la rupture du barreau.

II. Sur pièces. — **Épreuve de burinage.** — *Prélèvements.* — Sur les cinq catégories d'acier.

Mode d'essai. — *Résultat.* — Le métal doit être assez doux pour qu'on puisse enlever au burin un copeau, dans les mêmes conditions que s'il s'agissait d'acier forgé ou laminé non trempé.

Épreuve de choc des boîtes à huile. — *Prélèvements.* — *Mode d'essai.* — La boîte choisie pour essai, reposant par son plan de joint sur la chabotte, devra supporter le choc d'un mouton du poids de 12 kilogrammes tombant librement d'une hauteur constante de 2 mètres.

Résultats. — La pièce doit pouvoir supporter dix chocs successifs sans se fissurer.

Épreuve d'étanchéité des boîtes à huile. — *Mode d'essai.* — Chaque boîte sera maintenue pleine d'huile de graissage pendant vingt-quatre heures.

Résultats. — Aucune trace de suintement ne devra se manifester.

Épreuve à la pression de certaines pièces spéciales. — *Mode d'essai.* — Les pièces subissent deux essais à la pression. Le premier est fait chez le fournisseur, par pression hydraulique, lorsque les pièces sont encore à l'état brut.

Le second est fait lorsque la pièce est complètement finie d'ajustage et sous la pression du fluide qu'elle doit contenir en service.

La nature du fluide et les pressions à employer dans les deux essais sont indiquées par les dessins ou les commandes.

Le deuxième essai est fait chez le fournisseur ou chez le constructeur, suivant que la pièce est commandée finie ou qu'elle est commandée brute ou ébauchée, et le fournisseur en est responsable dans les deux cas.

Résultats. — Aucune fuite, ni suintement, ne devra se manifester.

CORPS DE ROUES EN ACIER MOULÉ

CHAPITRE I

CONDITIONS GÉNÉRALES

Classification. — La présente spécification s'applique aux corps de roues en acier moulé, bruts, ébauchés ou finis, suivant les indications de la commande.

Fabrication. — L'acier employé à la fabrication sera obtenu au creuset, au four Martin ou au convertisseur, selon les indications des commandes.

L'emploi dans les charges de fontes contenant plus de 0,1 0/0 de phosphore est absolument interdit.

Recuit. — Tous les corps de roues devront être recuits. La réussite du recuit est constatée par l'examen de la cassure des masselottes dont la texture doit être régulière, exempte de cristaux à facettes et de rayonnements normaux aux surfaces extérieures. Essayées au burin, ces pièces devront permettre de lever un copeau, comme on peut l'obtenir sur de l'acier ordinaire forgé ou laminé et non trempé.

Aspect. — Les parties brutes seront parfaitement ébarbées, dessablées et nettoyées : l'oxyde dont elles se recouvrent au recuit sera entièrement enlevé ; la jante sera régulière et les parties déformées par le retrait ou par le recuit seront convenablement dégauchies. Les corps de roues ne devront présenter aucune trace de raccords de moulage : ils devront être exempts de criques et de tapures ; les soufflures, piqûres, gouttes froides, retassures, traces de brûlure ou autres défauts devront être sans importance au point de vue de l'emploi. La Compagnie est juge de l'acceptation ou du rebut des pièces présentant de tels défauts.

Les pièces devront être livrées sans aucune peinture, même à la plombagine ou à la poudre d'ardoise.

CHAPITRE II

NATURE ET PROPORTION DES ESSAIS

Nature des essais. — Les essais auxquels seront soumis les corps de roues sont les suivants :

Sur éprouvettes :

Essai de traction ;

Essai de choc ;

Sur les pièces elles-mêmes :

Essai de résistance (défonçage et mandrinage);

Épreuve d'équilibrage.

Il pourra, en outre, être fait un essai pour déterminer la teneur en phosphore, laquelle ne devra pas excéder sept centièmes (0,07 0/0).

Proportion des essais. — La proportion des essais est la suivante :

Sur éprouvettes :

Traction	1 par coulée
Choc	1 —

Sur pièces :

Essai	de défonçage : sur toutes les roues..	1 par 100 pièces
	de mandrinage : sur les roues simples.	
Équilibrage : pour les roues simples seulement	individuellement pour les roues à livrer fines ou ébauchées.	
	1 par 50 pour les roues à livrer brutes.	
Teneur en phosphore		1 par coulée.

Toute fraction de lot peut donner lieu à une série complète d'essais au gré de la Compagnie.

CHAPITRE III

PRÉLÈVEMENTS ET PRÉPARATION DES ESSAIS

Prélèvements. — Les barreaux d'essais seront, au choix du fabricant, prélevés soit dans les parties les moins fatiguées des corps de roues ayant subi l'épreuve de résistance, soit dans la meilleure partie des masselottes après le recuit des pièces, soit dans des appendices attenant aux pièces.

Le moulage des lingots d'essais en châssis séparés n'a lieu que sur autorisation spéciale, et, dans ce cas, ces lingots sont coulés au sable et en coquille, comme les pièces, et recuits dans la même fournée que celles-ci.

Découpage et finissage. — Les barreaux sont découpés à froid et ne subissent d'autre travail que le découpage à la machine-outil et le tournage, s'il y a lieu.

Les prélèvements déformés présentant dans leur plus forte ondulation une flèche inférieure à 2 0/0 de la corde seront redressés à froid lorsque la déformation sera plus grande ; le redressement pourra se faire à chaud

en présence d'un agent réceptionnaire, la température ne devant pas dépasser le rouge sombre. Les barreaux de choc pourront toujours être redressés à chaud dans les mêmes conditions.

Les arêtes des barreaux pour essais de choc seront légèrement adoucies à la lime sans congé appréciable.

Préparation des corps des roues d'essais. — Les corps de roues choisis pour les essais de défonçage et de mandrinage du moyeu auront la jante et la hauteur du moyeu dégrossies à 2 millimètres près de la cote finie, et le moyeu alésé à la cote finie.

Par raison d'économie les corps des roues choisis pour ces essais seront pris de préférence parmi ceux présentant quelques défauts de forme de nature à les rendre impropres au service.

Poinçons de la Compagnie. — Les corps de roues et les barreaux d'essais conserveront les poinçons de la Compagnie.

CHAPITRE IV

MODES D'ESSAIS. — RÉSULTATS A OBTENIR

Condition générale. — Les résultats à obtenir, indiqués ci-après dans chaque essai, sont des minima absolus.

Toute épreuve qui ne remplira pas complètement les conditions fixées pourra donner lieu au rebut du lot correspondant.

Essai de traction. — *Forme des éprouvettes.* — Les têtes d'attache sont appropriées aux organes de fixation des machines d'essais; leurs formes et dimensions peuvent être considérées comme indifférentes, sous la condition de ne pas créer de flexions dans le sens de l'axe de traction : têtes excentrées, non symétriques, etc.

Les éprouvettes seront rondes et tournées : leurs extrémités peuvent être prises entre coins striés.

Repères. — L'écartement entre repères pour le relevé de l'allongement est déterminé par la formule $L = \sqrt{66,67S}$ (S étant la section). Ces repères sont croisés à partir de la naissance des congés. La fraction entre ces repères qui servira à calculer l'allongement pour 100 sera celle comprenant la section de rupture.

Dimensions des éprouvettes. — Éprouvettes cylindriques : pas plus de 25 millimètres de diamètre. Les dimensions à adopter de préférence sont les suivantes :

Diamètre.............................	15^{mm},96
Section..............................	200 millimètres carrés
Écartement des repères..............	115 millimètres
Longueur de la partie calibrée.......	147 —

Durée de l'essai. — Température. — L'essai a lieu par traction progressive, à la température ambiante. Sa durée, selon le volume du barreau, sera comprise entre une et six minutes.

Résultats. — Les résultats à obtenir sont ceux des catégories M1 ou M3 des aciers moulés, c'est-à-dire :

	Kilogr.
Résistance minima par millimètre carré de section primitive S......................	40 ou 45
Allongement minimum pour 100 mesuré sur une longueur entre repères $\sqrt{66,67S}$......	20 ou 15

Essai de choc sur barreaux. — *Enlèvements.* — *Dimensions.* — Les barreaux d'essais seront ramenés par finissage à une section carrée de 30 millimètres de côté et à une longueur d'environ 200 millimètres.

Mode d'essai. — Chaque barreau placé horizontalement sur deux couteaux espacés de 160 millimètres d'axe en axe et fixés sur une enclume ou chabotte pesant au moins 500 kilogrammes devra supporter le choc d'un mouton du poids de 50 kilogrammes tombant librement d'une hauteur constante de 3 mètres au milieu de l'intervalle des points d'appui.

La panne du mouton sera terminée par une partie cylindrique à rayon de 15 millimètres environ, sur un développement de 90°.

Après avoir supporté un premier choc, le barreau sera retourné sens dessus dessous et recevra deux chocs consécutifs, puis alternativement deux chocs dans chaque sens jusqu'à rupture.

Résultats. — Les barreaux doivent pouvoir supporter avant crique ou rupture les nombres de chocs ci-après, en comptant les chocs de redressement :

— 3 au minimum, si le métal est classé par l'essai de traction dans la catégorie M1, soit : R = 40 kilogrammes minimum, A = 20 0/0 minimum ;

— 2 au minimum, si le métal est classé par l'essai de traction dans la catégorie M3, soit : R = 45 kilogrammes minimum, A = 15 0/0 minimum.

Pour se renseigner, en outre, sur la qualité du métal, l'essai sera toujours poursuivi jusqu'à la rupture du barreau.

Essais sur les pièces. — *Défonçage du moyeu.* — Le corps de roue dégrossi et alésé étant posé à plat, de telle manière que la jante soit appuyée sur une couronne et soit seule soutenue, le moyeu sera déformé par des chocs ou à la presse, jusqu'à ce que le plan de sa face supérieure se soit abaissé d'une hauteur égale à 4 0/0 du diamètre à la jante.

Résultats. — Il ne devra se manifester, au cours de cet essai, aucune crique, gerçure, ni indice de rupture. On ne tiendra pas compte toutefois des criques, gerçures ou indices de rupture, qui se produiraient sur des bras ou nervures n'aboutissant pas au moyeu.

Après ce premier essai, on détachera le moyeu des bras, nervures ou toile qui le relient à la jante, en les rompant à l'aide du pilon ou de la

presse, ou en employant tout autre procédé, si la rupture ne peut être obtenue ainsi.

Les cassures devront être homogènes, avec texture à grains fins et réguliers sans soufflures.

Mandrinage du moyeu (sur les roues simples seulement). — Dans le moyeu détaché comme il est dit plus haut, on introduira successivement par le côté de la grande saillie, lorsque le type en comporte, des poinçons d'une conicité de 1/100, que l'on enfoncera jusqu'à ce que le diamètre intérieur du moyeu, mesuré du côté de l'entrée des poinçons, soit agrandi de 5 0/0.

Résultats. — Il ne devra se manifester, au cours de cet essai, ni crique, ni gerçure, ni indice de rupture. L'essai sera ensuite continué jusqu'à rupture, et les cassures devront être homogènes, avec texture à grains fins et réguliers sans soufflures.

Épreuve d'équilibrage. — *Prélèvements* (pour les roues simples seulement). — Si la commande porte que les roues sont à livrer brutes, une roue sur 50 sera tournée et alésée pour subir l'essai.

Mode d'essai. — ***Résultats.*** — Le balourd mesuré à l'extrémité d'un rayon de $0^m,500$ ne devra pas dépasser 250 grammes.

VIROLES POUR TUBES A FUMÉE

CHAPITRE I

CONDITIONS GÉNÉRALES

Classification. — Les viroles pour tubes à fumée sont en fer ou en acier doux.

Conditions de fabrication. — Les viroles sont obtenues par emboutissage sans soudure ou découpées dans des tubes non soudés, l'emploi de tubes soudés par recouvrement étant rigoureusement interdit.

Selon les indications de la commande, les viroles sont livrées soit brutes, soit tournées extérieurement sur mandrin dans toute leur longueur, soit enfin, après ce tournage, polies extérieurement et cuivrées ou bleuies.

CHAPITRE II

NATURE ET PROPORTION DES ESSAIS

Nature des essais. — Les essais auxquels sont soumises les viroles sont les suivantes :

Essais d'aplatissement;

Essais d'élargissement.

Proportion des essais. — L'agent réceptionnaire prélèvera au hasard 2 viroles par lot de 100.

CHAPITRE III

PRÉLÈVEMENTS ET PRÉPARATION DES ESSAIS

Les viroles sont essayées à l'état de livraison.

Poinçons de la Compagnie. — Elles conservent les poinçons de la Compagnie.

CHAPITRE IV

MODES D'ESSAIS. — RÉSULTATS A OBTENIR

Condition générale. — Les résultats à obtenir, indiqués ci-après dans chaque essai, sont des minima absolus.

Toute épreuve qui ne remplira pas complètement les conditions fixées pourra donner lieu au rebut du lot correspondant.

Essai d'aplatissement. — Une virole saisie entre les mors d'un étau devra pouvoir être aplatie jusqu'à ce que la distance *r* soit au maximum égale à un tiers de D.

Résultats. — Cet essai doit être obtenu sans qu'il se manifeste aucune crique.

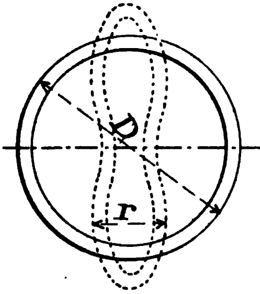


FIG. 84.

Essai d'élargissement. — Une virole sera évasée au moyen d'un mandrin conique, de manière à obtenir, à l'entrée de l'évasement, une augmentation de diamètre de 6 0/0.

Résultats. — Cet essai doit être obtenu sans qu'il se manifeste aucune crique.

TUBES A FUMÉE DE CHAUDIÈRES EN ACIER DOUX

CHAPITRE I

CONDITIONS GÉNÉRALES

Classification. — La présente spécification s'applique aux tubes lisses ou à ailettes en acier doux, soudés par recouvrement ou étirés sans soudure, ayant un diamètre extérieur maximum de 100 millimètres et une épaisseur de 4 millimètres minima.

CHAPITRE II

NATURE ET PROPORTIONS DES ESSAIS

Séries des essais. — 1° Épreuve à la pression hydraulique;
2° Épreuve d'aplatissement;
3° Épreuve de rabattement d'une collerette;
4° Épreuve d'élargissement.
Tous ces essais seront faits à froid.

Proportion des essais. — Essais à la pression : tous les tubes;
Autres essais : un tube sur 100.

CHAPITRE III

PRÉLÈVEMENTS ET PRÉPARATION DES MORCEAUX D'ESSAIS

Prélèvements. — Les prélèvements pour essais seront effectués, d'après les indications de l'agent réceptionnaire, sur un tube choisi par lui dans chaque lot.

Préparation des essais. — Pour les essais 2°, 3° et 4°, on coupera des bouts de tube de 100 millimètres environ, qui seront recuits. Lorsqu'il s'agira de tubes à ailettes, celles-ci seront préalablement enlevées si c'est nécessaire, pour les épreuves de rabattement et d'élargissement.

CHAPITRE IV

MODES D'ESSAIS. — RÉSULTATS A OBTENIR

Condition générale. — Les résultats à obtenir indiqués ci-après dans chaque essai sont des minima absolus.

Toute épreuve qui ne remplira pas complètement les conditions fixées pourra donner lieu au rebut du lot correspondant.

Essais à la pression hydraulique. — *Mode d'essai.* — La pression d'eau intérieure à appliquer sera de 25 kilogrammes par centimètre carré. Cette pression sera maintenue pendant une minute.

Résultats. — Le tube ne devra présenter aucune trace de suintement ni d'altération.

Essais d'aplatissement, de rabattement et d'élargissement. — *Modes d'essais :*

Aplatissement. — Le morceau de tube posé sur une surface plane, la soudure, s'il en existe une, sur le plan diamétral parallèle à cette surface, sera aplati au pilon jusqu'à ce que son diamètre intérieur soit réduit de 90 0/0.

Rabattement d'une collerette. — On rabattra, à angle droit, avec la génératrice du tube, une collerette ayant pour largeur 4 fois l'épaisseur du métal. Elle sera obtenue en deux opérations faites, la première avec un mandrin conique rabattant à 45°; la seconde avec un mandrin cylindrique à tête raccordée au corps par un congé d'un rayon égal à deux fois l'épaisseur du métal. La largeur de la collerette sera mesurée entre son arête extérieure et le prolongement des génératrices intérieures de la partie du tube restée cylindrique.

Élargissement. — L'extrémité du bout du tube sera évasée sur une longueur égale au diamètre extérieur au moyen d'un mandrin conique, de manière à obtenir à l'entrée de l'évasement une augmentation de diamètre de 6 0/0.

Résultats. — Au cours de ces trois épreuves, il ne devra se produire ni crique, ni gerçure, ni dessoudure, ni aucun autre défaut.

TUYAUX BRUTS POUR FREINS A AIR INTERCOMMUNICATION PNEUMATIQUE — CHAUFFAGE PAR LA VAPEUR, ETC.

CHAPITRE I

CONDITIONS GÉNÉRALES

Classification. — La présente spécification s'applique aux tuyaux bruts pour freins à air, intercommunication pneumatique, chauffage par la vapeur, etc.

Les tuyaux sont en fer ou en acier doux. Ils sont, suivant les indications des commandes, soudés par rapprochement, soudés par recouvrements ou étirés sans soudure.

Marques de fabrication. — Les tuyaux doivent porter très visiblement à l'une des extrémités et à environ 20 centimètres du bout :

1° La marque de l'usine ;

2° Le mois et le millésime de fabrication :

Exemple : M. R. 10,01.

Aspect extérieur. — Les surfaces des tuyaux doivent être parfaitement nettes, bien lisses, sans pailles, criques, gales, éraflures, dessoudures, fissures ou autres défauts.

Les tuyaux de freins à air comprimé et d'intercommunication pneumatique, droits ou cintrés, devront avoir leur diamètre intérieur calibré de façon à permettre le libre passage d'une bille en métal dur, ayant un diamètre minimum égal à 75 0/0 du diamètre intérieur du tuyau commandé.

Cette condition n'est pas applicable aux tuyaux cintrés, dont le rayon intérieur *r* de courbure sera inférieur à 30 millimètres.

Les tuyaux seront bien cylindriques, d'épaisseur et de diamètre constants sans ovalisation, sauf certaines tolérances.

CHAPITRE II

NATURE ET PROPORTIONS DES ESSAIS

Séries des essais. — *Essais à froid :*

1° Épreuve à la pression hydraulique ;

2° Épreuve d'aplatissement (sauf sur les tuyaux soudés par rapprochement) ;

Essais à chaud :

3° Épreuve de cintrage.

CHAPITRE III

PRÉLÈVEMENTS ET PRÉPARATION DES MORCEAUX D'ESSAIS

Prélèvements. — Les prélèvements pour essais seront effectués d'après les indications de l'agent réceptionnaire, sur un tuyau choisi par lui dans chaque lot.

Préparation des essais. — Pour les essais d'aplatissement et de cintrage on coupera des bouts de tuyaux de 100 millimètres et de 400 millimètres environ. Le morceau pour essai d'aplatissement sera recuit.

CHAPITRE IV

MODES D'ESSAIS. — RÉSULTATS A OBTENIR

Condition générale. — Les résultats à obtenir, indiqués ci-après dans chaque essai, sont des minima absolus.

Toute épreuve qui ne remplira pas complètement les conditions fixées pourra donner lieu au rebut du lot correspondant.

Épreuve à la pression hydraulique. — *Mode d'essai.* — La pression d'eau intérieure à appliquer sera de 20 kilogrammes par centimètre carré pour les tuyaux de freins à air et intercommunication et de 15 kilogrammes pour les autres.

La pression sera maintenue pendant une minute.

Résultats. — Le tuyau ne devra présenter aucune trace d'altération ni de suintement.

Épreuve d'aplatissement à froid. — *Mode d'essai.* — Le bout de tuyau de 100 millimètres posé sur une surface plane (le milieu de la soudure, s'il en existe une, sur le plan diamétral parallèle à cette surface) sera aplati au pilon ou à la presse jusqu'à ce que son diamètre intérieur soit réduit à 25 0/0.

Résultats. — Il ne devra se produire ni crique, ni gerçure, ni dessoudure ni aucun autre défaut.

Épreuve de cintrage à chaud. — *Mode d'essai.* — Le bout de tuyau de 400 millimètres devra pouvoir être cintré à chaud dans deux plans perpendiculaires, comme l'indique le croquis ci-contre et suivant un arrondi ayant pour rayon intérieur *r* ;

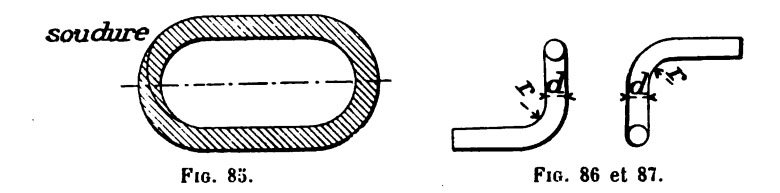


Fig. 85. Fig. 86 et 87.

Le diamètre extérieur *d* du tuyau, pour les tuyaux soudés par recouvrement ou sans soudure ;

Et 2 fois et demie le diamètre extérieur *d* du tuyau, pour les tuyaux soudés par rapprochement.

Résultats. — Il ne devra se produire aucune crique, ni dessoudure.

ADMINISTRATION DE LA MARINE

CONDITIONS TECHNIQUES A INSCRIRE DANS LES MARCHÉS POUR FOURNITURE DE PIÈCES EN ACIER MOULÉ ORDINAIRE

(23 décembre 1902)

Dans l'exécution des pièces, il sera accordé sur les dimensions et poids les tolérances suivantes [1] :

Sur la longueur et la largeur : 3 millimètres plus 5 millimètres par mètre, en plus ou en moins.

1. Ces tolérances s'appliquent aux pièces non ajustées. Les chiffres indiqués ne sont pas strictement obligatoires, et on pourra s'en écarter lorsque les conditions particulières l'exigeront.

Sur les épaisseurs :

	En plus	En moins
Au-dessous de 15mm....	1mm,5	1mm,5 ou 1/7 de l'épaisseur
De 15 millim. à 35mm....	1/10 de l'épaisseur	1/7 de l'épaisseur
Au-dessus de 35mm....	3mm,5	5 millimètres

Exécution. — Le métal sera obtenu au four Martin, au creuset ou au convertisseur.

Aussitôt après le démoulage, les pièces seront marquées du numéro de la coulée. L'ingénieur-contrôleur sera juge des cas où, s'il s'agit d'un grand nombre de petites pièces, il pourra dispenser le fournisseur de cette formalité.

Le métal sera doux, homogène, facile à limer et à tourner, dépourvu de scories ou de gouttes froides.

Les pièces seront exemptes de gerçures, criques, retassures ou autres défauts qui pourraient nuire à leur solidité, à leur emploi ou à leur aspect.

On tolérera les soufflures en petit nombre, peu importantes et ne compromettant pas la solidité ou l'emploi de la pièce.

Les pièces après démoulage seront soumises à un recuit à haute température.

Elles seront trempées si le fournisseur le juge utile.

Après le recuit ou la trempe, on s'assurera, en détachant les nervures de coulée, que le grain de l'acier est devenu fin et régulier.

Les soufflures ou défournis sans gravité pourront être bouchés ou réparés à la soudure électrique ou à la soudure autogène.

Il en sera de même des criques de peu de gravité, mais seulement dans les parties qui n'ont pas d'importance pour la solidité de la pièce, eu égard à sa forme ou à sa destination.

Après toute soudure, les pièces subiront un nouveau recuit.

Dans les pièces dont l'étanchéité est vérifiée par un essai à l'eau sous pression, les suintements que peuvent faire disparaître de légers matages ne seront pas un motif de rebut.

Lorsque les pièces ne seront pas soumises à un essai à l'eau sous pression, l'ingénieur-contrôleur pourra néanmoins exiger un essai ou remplissage à l'eau sous pression, s'il le juge nécessaire afin de vérifier l'importance des défauts, tels que criques, soufflures, etc...

Toute réparation par soudure, matage, mastiquage, ou tout autre procédé, qui serait entreprise sans l'autorisation expresse de l'ingénieur-contrôleur, entraînera le rebut de la pièce.

Les pièces seront parfaitement désablées ; la surface en sera lisse, sans dartres ni rugosités. Les nervures de fonderie seront détachées et rasées avec soin. Toutefois, avec l'autorisation de l'ingénieur-contrôleur, on pourra conserver celles qui seraient jugées sans inconvénient pour l'emploi de la pièce et qui n'en dépareraient pas l'aspect.

Toutes les pièces destinées à être ajustées dans lesquelles le travail ultérieur ferait reconnaître des défauts préjudiciables à l'emploi seront retournées au fournisseur à ses frais. Elles seront remplacées ou réparées si l'ingénieur-contrôleur en autorise la réparation. Dans ce dernier cas, on s'assurera après le recuit final, par un traçage complet, que la pièce a des dimensions suffisantes pour un nouvel ajustage.

Essais. — La bonne qualité du métal sera constatée par les épreuves suivantes :

1° *Essais de traction.* — Des barrettes prélevées comme il est dit plus loin seront tournées à 13mm,8 de diamètre sur 100 millimètres de longueur. Soumises à la traction, elles devront donner au minimum comme moyenne d'une même coulée :

R (résistance à la rupture)	50 kilogrammes
A (allongement mesuré sur 100 millimètres).	12 —

Somme $R + A = 62$.

On tolérera, toutefois, sur la résistance un déficit pouvant s'élever à 5 kilogrammes, pourvu qu'il soit compensé par une augmentation de l'allongement telle que la somme RA ne soit pas inférieure à 62.

2° *Essais au choc.* — Les barreaux de choc auront 30 millimètres de côté et 20 centimètres de longueur.

Ils seront soumis au choc d'un mouton du poids de 18 kilogrammes tombant d'une hauteur de 2 mètres.

Les barreaux d'une même coulée devront, en moyenne, supporter sept coups sans rupture, et aucun barreau reconnu sain ne devra rompre avant le quatrième coup.

Dans ces épreuves, le barreau reposera sur deux couteaux espacés de 0m,16 et fixés sur une enclume pesant au moins 350 kilogrammes. Le mouton se terminera à la partie inférieure en forme d'ellipsoïde dont le rayon de courbure sera au plus de 24 millimètres dans le plan du barreau et de 32 millimètres dans le plan perpendiculaire.

Les barrettes de traction et de choc seront prises soit sur les pièces elles-mêmes, soit dans les masselottes, soit encore sur des éprouvettes coulées en même temps que les pièces et attenant à celles-ci par un jet de coulée.

Le nombre des barrettes et des barreaux sera fixé par l'ingénieur-contrôleur. Il sera, au minimum, de trois de chaque sorte pour chaque coulée. Les appendices réservés sur les pièces ou les éprouvettes seront en nombre suffisant pour qu'il puisse être procédé à trois séries d'essais. Ils seront ensuite coulés à diverses périodes de la coulée.

Dans les pièces de grandes dimensions, telles que les étraves ou les étambots, des appendices seront réservés aux deux extrémités.

Les appendices ou éprouvettes, ainsi qu'un certain nombre de nervures

de coulée, ne seront détachées des pièces qu'après la fin des opérations de trempe et de recuit.

Les barrettes reconnues non saines, soit au cours de la préparation, soit pendant les épreuves, seront écartées, et il en sera prélevé d'autres.

Le nombre des barrettes malsaines ne devra pas dépasser la moitié du nombre total des barrettes prélevées.

Lorsque les épreuves précédentes auront donné des résultats inférieurs à ceux exigés, les pièces pourront être soumises à de nouvelles opérations de trempe et de recuit, après lesquelles il sera procédé à un second et, s'il y a lieu, à un troisième essai.

Si les résultats de ce dernier étaient encore insuffisants, les pièces seraient refusées.

CONDITIONS TECHNIQUES A INSCRIRE DANS LES MARCHÉS A PASSER POUR FOURNITURES DE PIÈCES EN ACIER MOULÉ SUPÉRIEUR

Dans l'exécution des pièces, il sera accordé sur les dimensions et poids les mêmes tolérances que pour l'acier ordinaire.

Exécution. — Le métal sera obtenu au four Martin, au creuset ou au convertisseur, à l'exception du métal destiné aux pièces devant contenir de la vapeur, qui devra provenir exclusivement de coulées au four Martin ou au creuset.

Les autres conditions comme l'acier ordinaire.

Essais. — La bonne qualité du métal sera constatée par les épreuves suivantes :

1° *Essais de traction.* — Des barrettes prélevées seront tournées à $13^{mm},8$ de diamètre sur 100 millimètres de long. Soumises à la traction, elles devront donner au minimum comme moyenne d'une même coulée :

$$\begin{aligned} R &= 42 \text{ kilogrammes} \\ A\ 0/0 &= 18 \quad — \\ \text{Somme } R + A &= 60 \quad — \end{aligned}$$

On tolérera toutefois sur la résistance un déficit pouvant s'élever à 8 kilogrammes, pourvu qu'il soit compensé par une augmentation de l'allongement telle que la somme R + A ne soit pas inférieure à 60.

2° *Essais au choc.* — Les barreaux de choc auront 2 millimètres de côté et $0^{m},20$ de longueur.

Ils seront soumis au choc d'un mouton du poids de 18 kilogrammes

tombant d'une hauteur de 2 mètres jusqu'à ce qu'ils aient pris entre couteaux une flèche de 40 millimètres au moins. Ils ne devront présenter après cet essai aucune crique ou trace de rupture.

Les barreaux d'une même coulée devront en moyenne supporter sept chocs sans rupture, et aucun barreau reconnu sain ne devra rompre avant le quatrième coup.

Dans ces épreuves, le barreau reposera sur deux couteaux espacés de $0^m,16$ et fixés sur une enclume pesant au moins 350 kilogrammes.

Le mouton se terminera à la partie inférieure en forme d'ellipsoïde dont le rayon de courbure sera au plus de 24 millimètres dans le plan du barreau et de 32 millimètres dans le plan perpendiculaire.

3° *Essais de ployage.* — Après l'épreuve de choc précédente, les barreaux seront ployés debout au pilon ou à la presse. Aucun barreau reconnu sain ne devra rompre avant d'avoir subi une flexion de 90°, et la moitié devra pouvoir se ployer sans rupture à 155°.

Les barrettes de traction et de choc seront prises soit sur les pièces elles-mêmes, soit dans les masselottes, soit encore sur des éprouvettes coulées en même temps que les pièces et attenant à celles-ci par un jet de coulée.

Le nombre des barrettes et des barreaux sera fixé par l'ingénieur-contrôleur. Il sera au minimum de trois de chaque sorte pour chaque coulée.

Dans les pièces de grandes dimensions telles que les étraves ou les étambots, des appendices seront réservés aux deux extrémités.

Les appendices ou éprouvettes, ainsi qu'un certain nombre de nervures de coulée, ne seront détachés des pièces qu'après la fin des opérations de trempe et de recuit.

Les barrettes reconnues non saines, soit au cours de la préparation, soit pendant les épreuves, seront écartées et il en sera prélevé d'autres.

Le nombre des barrettes malsaines ne devra pas dépasser la moitié du nombre total des barrettes prélevées.

Lorsque les épreuves précédentes auront donné des résultats inférieurs à ceux exigés, les pièces pourront être soumises à de nouvelles opérations de trempe et de recuit, après lesquelles il sera procédé à un second et, s'il y a lieu, à un troisième essai. Si les résultats de ce dernier étaient encore insuffisants, les pièces seraient refusées.

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE III

COURBES DE REFROIDISSEMENT

Ball, *Iron and Steel Institute*, 1890 et 1891.
Carpenter et Keeling, *Iron and Steel Institute*, mai 1904.

Guillet, *Génie civil*, t. XLII, 1903, nos 23 et 24.

Von Juptner, *Eléments de sidérologie*, Bérenger, 1905, t. II, p. 13 et p. 141.

Le Chatelier, *Revue de Métallurgie*, février 1904 ; — *Revue générale des Sciences*, 15 janvier 1897.

Lévy Léon, *Commission des Méthodes d'Essais*, 6 avril 1895.

Osmond, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, t. CIII, CIV, CVI, CX, CXII, CXIII et CXVIII ; — *Études métallurgiques* (*Annales des Mines*, 1888) ; — *Iron and Steel Institute*, 1890, p. 38 ; — *le Fer et l'Acier* (*Lumière électrique*, 1890) ; — *Mémorial de l'Artillerie de marine*, 1887 et 1891 ; — *Rapport à la Commission des Méthodes d'Essais*, octobre 1892.

MÉTALLOGRAPHIE MICROSCOPIQUE

Arnold, *Engineering*, mai 1896 ; — *Journal of the Iron and Steel Institute*, 1890, 1894, 1899 ; — *Id.*, meeting d'août 1898 et mai 1901 ; — *Proceedings of the Institution of civil Engineers*, 1895 ; — *The mineral Industry*, 1896 ; — *The Metallographist*, janvier 1899.

Bénédicks, *Recherches sur les aciers au carbone* (Thèse), Upsala, 1904.

Commission de l'Iron and Steel Institute (*Journal* de cette société, 1902, t. I).

Guillet, *Association des Méthodes d'Essais* (Groupe français), séances de 1903 et 1904 ; — *Bulletin de la Société d'Encouragement*, 1903 et 1904 ; — *les Aciers spéciaux* (2 volumes), Vve Dunod, éditeur ; — *Société des Ingénieurs civils de France*, juillet 1903, février 1904 ;

Von Juptner, *Éléments de sidérologie*, t. I, p. 87.

Kourbatoff, *Revue de Métallurgie*, mars 1905.

Le Chatelier, *Bulletin de la Société d'Encouragement*, septembre 1900 ; — *Cours du Collège de France*, années scolaires 1899-1900, 1900-1901 ; — *Revue générale des Sciences*, 1899 ; — *Revue de Métallurgie*, p. 207, 1904 et août 1905 ; — *Journal de Chimie physique*, I, 1904, p. 481 ; — *Congrès de Métallurgie de Liège*, 1905.

Le Chatelier et Ziégler, *Bulletin de la Société d'Encouragement*, 1902.

Martens, *Zeitung des Vereinsdeutsch. Ing.*, 1878, 1881 ; — *Stahl und Eisen*, septembre 1882 ; avril 1887 ; mai 1889 ; mai 1892 ; juillet 1892 ; septembre 1894 ; juin 1895 ; octobre 1895.

Osmond, *Bulletin de la Société d'Encouragement*, mai 1895 ; — *Comptes Rendus*, 1891, 1894, 1895, 1899 ; — *Journal of the Iron and Steel Institute*, 1891, t. I, p. 100 ; 1894, t. I, p. 316 ; 1895, septembre ; — *la Lumière électrique*, février 1890 ; — *la Métallographie considérée comme méthode d'Essais*, Stuttgart, 1897 ; — *Rapport à la Commission des Méthodes d'Essais des matériaux de construction*, octobre 1892 ; — *Transactions of the American Institute of Mining Engineers* (Congrès de Chicago), 1893 et 1897 ; — *The Metallographist*, 5 octobre 1899 ; janvier 1900 ; janvier 1901.

Osmond et Cartaud, *Annales des Mines*, janvier 1900, août 1900.

Osmond et Werth, *Théorie cellulaire des propriétés de l'acier* (*Annales des Mines*, juillet-août 1885).

Roberts-Austen, *Institution of the Chem. Eng.*, février 1899.

Saniter, *Journal of the Iron and Steel Institute*, 1896.

Sauveur, *Engineering and Mining Journal*, juin et novembre 1897 ; — *Journal Iron and Steel Institute*, 1897 ; — *Metallographist* dans les divers volumes de 1898 à 1902 ; — *Institution of Mining Engineers*, 1893.

SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT POUR L'INDUSTRIE NATIONALE : *Contribution à l'étude des alliages métalliques.*

Sorby, *British Association Report*, 1864, t. II, p. 189 ; 1865, t. I, p. 139 ; — *Engineering*, 16 janvier 1891 ; — *Journal of the Iron and Steel Institute*, 1886, t. I, p. 140 ; 1887, t. I, p. 255 ; 1893, t. I, p. 365 ; — *Proceedings of the Royal Society*, XIII, 333 ; — *The Engineer*, 27 octobre 1882.

Stein, *Stahl und Eisen*, septembre 1888 ;

Stead, *Engineering*, décembre 1901 ; — *Iron and Steel Institute*, 1894-1897, meeting de mai 1898, 1900, 1902 ; — *Metallographist*, juillet 1898, octobre 1898, octobre 1899.

Tschernoff, *Société technique impériale de Russie*, avril 1868 ; décembre 1878.

Wedding, *Journal of the Iron and Steel Institute*, 1885, p. 187 ; 1886, p. 989 ; — *Stahl und Eisen*, septembre 1885, octobre 1886, février 1887, avril 1889, novembre 1891, mai 1892, novembre 1893, octobre 1894 ; — *Mittheilungen aus den Technischen Versuchsanstalten zu Berlin*, 1886.

RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE

Barrett, *Conductibilité électrique et Perméabilité magnétique des alliages de fer* (*Scient. Trans. of the Royal Dublin Society*, VII, 2 janvier 1900, p. 67 (en commun avec MM. Brown et Hadfield).

Bénédicks, *Recherches sur les aciers au carbone* (Thèse), Upsala, 1904 ; — *Résistance électrique du fer et de l'acier* (*Zeitsch. physik. Chemie*, t. L, p. 545, 1902).

Boudouard, *Iron and Steel Institute*, meeting de mai 1903 (*Bulletin de la Société d'Encouragement*, octobre 1903).

Cailletet et Bouty, *Résistance électrique du fer* (*Comptes Rendus*, t. C, p. 1188).

Guillet, *Constitution des alliages* (*Génie civil*), 1902, t. XLI.

Hadfield, *Iron and Steel Institute*, mai 1894.

Harrison, *Variations de force électromotrice et de résistance électrique du nickel, du fer et du cuivre* (*Philos. magaz.* et *Journ. Sc.*, février 1902, p. 177).

Hopkinson, *Variation de résistance électrique* (*Philos. Trans.*, p. 443, 1889)

Von Juptner, *Éléments de sidérologie*, t. II, p. 168.

Kohlrausch, *Résistance électrique des aciers* (*Wiedemann Ann.*, t. XXXIII, 1887).

Le Chatelier, *Résistance électrique des fers et aciers ;* — *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, t. CX, p. 283 (1890) ; t. CXI, p. 454 (1890) ; t. CXII, p. 40 (1891) ; t. CXIX, p. 272 (1894) ; t. CXXVI, p. 1709 (1898) ; t. CXXVI, p. 1782 (1898) ; — *Contribution à l'étude des alliages* (ouvrage publié par la Société d'Encouragement de Paris, p. 414 ; — *Résistance électrique des aciers* (*Journ. Physique*, t. VII, p. 199 (1891) ; — *Transformations allotropiques*

du fer (Société de physique, séance du 20 avril 1894); — *Notice sur les travaux scientifiques* de M. H. le Chatelier (Gauthier-Villars, 1897 et 1900).

Martens, Palzoow et Wedding, *Résistance électrique des aciers* (*Mittheilung. aus der k. technischen Versuchtanstellen*, Ergänzungsheft II, 1887, Ergänzungsheft I (1888).

Matthiesen et Vogt, *Résistance électrique des fers* (*Pogg. Ann.*, t. CXVIII, p. 431, 1863).

Mathews, *Electrical World and Engineer*, 4 octobre 1902; — *The Metallographist*, octobre 1903.

Mousson, *Résistance électrique des aciers* (Wiedemann, *Lehre von der Electricität*, t. I, p. 502-510, 1882).

Osmond, *Résistance électrique du fer et de l'acier, ses rapports avec la composition chimique, la trempe et le recuit* (*Rap. de la Com. des Méthodes d'Essais des matériaux de construction*, 10 octobre 1862).

Schneider et C[ie], *Résistance électrique des fers* (*Industrie progressive*, 1[er] décembre 1881).

THERMO-ÉLECTRICITÉ

Barus et Strouhal, *The electrical and magnetic properties of the iron carburets* (*Bull. of the U. S. geological Survey*, 1885); — *le Revenu et le Recuit des aciers en relation avec la thermo-électricité et la résistance électrique* (*Wied. Ann.*, t. XI, 1880, p. 930).

Becquerel, *Ann. de Chim. et de Physique*, 2[e] série, t. XLI, p. 353.

Belloc, Thèse de doctorat, Gauthier-Villars, 1903.

Boudouard, *Bulletin de la Société d'Encouragement*, octobre 1903; — *Revue de Métallurgie*, février 1904.

Gaugain, *Mémoire sur les courants thermo-électriques* (*Ann. de Chim. et de Phys.*, 3[e] série, t. LXV, p. 1.

Harrison, *Sur la variation, avec la température, de la force électromotrice et de la résistance électrique du nickel, du fer et du cuivre aux températures comprises entre 250° et 1.050°* (*Philosophical Magazine*, février 1902).

Le Chatelier, *De la mesure des températures élevées par les couples thermo-électriques* (*Journal de physique*, 2[e] série, t. VI, janvier 1887); — *Propriétés thermo-électriques* (*Bulletin de la Société chimique*, 1886, p. 482); — *Variation de la force électromotrice des couples thermo-électriques* (*Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, t. CII, p. 819).

Le Chatelier et Boudouard, *Mesures des températures élevées* (G. Carré et C. Naud, éditeurs, 1900).

Steinmann, *Comptes Rendus*, CXXX, 1900.

Tait, *Proceedings of the royal Society of Edimburg*, 1871-1872 et 1877-1888.

MAGNÉTISME

Bénédicks, *Recherches sur les aciers au carbone* (Thèse), Upsala, 1904.

M[me] Curie, *Bulletin de la Société d'Encouragement*, janvier 1895.

P. Curie, *Ann. de Chim. et de Phys.*, 1895.

Dewar et Fleming, *Proceedings Royal Society*, t. CX, 1896.
Hadfield, *Iron and Steel Institute*, mai 1894.
Hopkinson, *Société royale de Londres*, 2 décembre 1889.
Juptner, *Éléments de sidérologie*, t. II, p. 194.
Le Chatelier, *Comptes Rendus*, t. CX, p. 283; — *Revue générale des Sciences*, 1895.
Osmond, *Comptes Rendus*, t. CXXVIII, p. 306 et X 1396 ; t. CXVIII, p. 532; — *Revue générale des Sciences*, 1903; — *Metallographist*, juillet 1899.

DILATATION

Barrett, *Philosophical Magazine*, vol. XLVI, 1873.
Charpy et Grenet, *Bulletin de la Société d'Encouragement*, avril 1903 ; — *Comptes Rendus*, t. CXXXIV, p. 540 et 598; — *Comptes Rendus*, 10 octobre 1904.
Evrard, *Génie civil*, 23 avril 1887.
Gore, *Proceedings of the Royal Society*, 1869.
Juptner, *Éléments de sidérologie*, t. II, p. 151.
Le Chatelier, *Bulletin de la Société d'Encouragement*, octobre 1898 ; — *Revue générale des Sciences*, 1895 et 1897.
Moreau, *Comptes Rendus*, t. CXXVIII, p. 192.
Svedelius, *Dingler's Polytechnicum Journal*, 1897.

DENSITÉ

Bénédicks, *Recherches sur les aciers au carbone* (Thèse).
Juptner, *Éléments de sidérologie*, I, 151.

ÉTUDE CHIMIQUE

Bénédicks, *Recherches sur les aciers au carbone* (Thèse).
Behrens et van Linge, *Recueil des Travaux chimiques des Pays-Bas*, 1894.
Carnot et Goutal, *Annales des Mines*, octobre 1900; — *Comptes rendus*, 2 mai 1898, 19 juillet 1897, 9 juillet 1900, 23 janvier 1899, 2 mai 1898 ; — *Contribution à l'étude des alliages* (Société d'Encouragement).
Juptner, *Éléments de sidérologie*, p. 137.
Le Chatelier, *Revue générale des Sciences*, 30 juin 1895 ; — Société d'Encouragement, *Contribution à l'étude des alliages*, 1901.
Stead, *Engineering*, 19 octobre 1900.

ÉTUDE INDUSTRIELLE

TRAITÉS GÉNÉRAUX

Bresson, *Métallurgie du fer et de la fonte*, Dunod, éditeur.
Bresson, *Métallurgie de l'acier*. *Id.*

Gages, *Traité de Métallurgie du fer*, Bernard, éditeur.
Howe, *Fabrication de l'acier*, Bérenger, 1894.
Ledebur, *Métallurgie du fer*, Baudry et Cie, éditeurs, 1904.
Moissan, *Traité de Chimie minérale*, t. IV.
Noble, *Fabrication de l'acier*, Dunod, 1905.
Le Verrier, *Cours de Métallurgie*, professé à l'école de Saint-Étienne.

MÉMOIRES PARTICULIERS SUR LES PROPRIÉTÉS

Akermann, *Iron and Steel Institute*, 1879, II (*Trempe*).

Andrews, *Proc. civil Eng.*, XCVIII, IVe partie (*Influence du travail à froid*).

Arnold, Société d'Encouragement, janvier 1896 (*Influence du carbone*); — *Iron and steel Institute*, 1896, I (*Trempe*).

Baudrimont, *Ann. de Chim. Phys.*, série III, t. XXX, p. 304 (*le Recuit*).

Bauschinger, *Einfluss des Ausglühens auf die mechanischen Eigenschaften, Mitteilungen aus dem mechanisch. technichen Laboratorium in München*, Heft 13.

Brinell, *Baumaterialienkunde*, 1900, n° 18 *bis*, 26; — *Congrès international des méthodes d'Essais*, Paris, 1900 (*Méthode d'Essais*).

Brinell et Wahlberg, Société d'Encouragement, juillet 1902 (*Propriétés et traitements*).

Campbell, *Iron and Steel Institute*, septembre 1903 (*Traitement calorifique*).

Charpy, *Comptes Rendus*, XCVII, p. 851, 1893 (*Propriétés*); — Société d'Encouragement, juin 1895 (*Trempe*); — Société des Ingénieurs civils de France, juin 1901 (*Fragilité*).

Deshayes, *Ann. des Mines*, 1879, p. 239 (*Formules de résistance*).

Fairbairn, *Repr. British Ass. Advanc. of Science*, 1856, p. 405 (*Influence du chauffage*).

Frémont, Société d'Encouragement, octobre 1897, 1901, p. 254 (*Fragilité, nouvelle méthode d'essais*).

Guillery, *Revue de Métallurgie*, 1904, p. 405 (*Essais des métaux*).

Grosse, *Glaser's Ann.*, XX, 5, 21 (*Fragilité au bleu*).

Howard, *Iron Age*, 1890, p. 585 (*Influence de la température*).

Howe, *Iron and steel Institute*, 1895, II (*Influence du travail à froid*); — *Id.*, 1897, I (*Influence de la trempe sur un acier extra-doux*); — *Eng. and Min. Journal*, 1887, I, p. 241 (*Influence du carbone*), — *Id.*, 1887, 44, p. 423. (*Influence du manganèse*); — *Id.*, 1887, 44, p. 135 (*Influence du phosphore*).

Howe et Sauveur, Société d'Encouragement, septembre 1896 (*Trempe*).

Hadfield, *Iron and Steel Institute*, mai 1905 (*Propriétés à basse température*).

Von Juptner, *Éléments de sidérologie*, t. II.

A. Le Chatelier, *Commission des Méthodes d'essais*, Paris, 1892 (*Influence de la température*).

H. Le Chatelier, Société d'Encouragement, décembre 1893 (*Dureté*); — *Id.*, décembre 1895 (*Double trempe*); — *Id.*, juillet 1902 (*Rapp. entre la fragilité et le traitement*); — *Revue de métallurgie*, 1904, p. 617 (*Fragilité*).

Osmond, *Annales des Mines*, 8e série, I, p. 46, 1886 (*Travail à froid*); —

Comm. des méthodes d'essais, Paris, 1892 (*Essais de trempe*) ; — *Société de l'industrie minérale*, 3e série, t. III, p. 1045, 1889 (*Nouveaux procédés de trempe*).

Sauveur, Congrès de Chicago, 1893 (*Grosseur du grain*).

Saniter, *Iron and Steel Institute*, 1897, II (*Carbon and Iron*).

Stansfield, *Iron and Steel Institute*, septembre 1903.

Stead, *Iron and Steel Institute*, septembre 1903 (*Rails en acier sorbitique*).

Stead et Richards, *Iron and Steel Institute* (*Régénération de l'acier cristallisé*).

Wedding, *Handbuch der Materialienkunde für den Maschinenbau.*

CHAPITRE IV

ACIERS SPÉCIAUX

Les aciers spéciaux peuvent être divisés en deux groupes principaux :

1° Les aciers ternaires; nous appellerons ainsi les alliages de fer, de carbone et d'un troisième corps mis intentionnellement, les impuretés ne dépassant pas les pourcentages normaux ;

2° Les aciers quaternaires : alliages de fer, de carbone et de deux autres corps.

L'industrie n'utilise pas d'aciers plus complexes.

Au cours de ce chapitre, nous résumerons les études que nous avons faites sur les aciers spéciaux.

Ne pouvant entrer dans tous les détails, nous prions le lecteur de se reporter aux livres particuliers et aux mémoires que nous avons écrits sur ce sujet[1].

ACIERS TERNAIRES

Les principaux aciers ternaires sont :

Les aciers au nickel ;

Les aciers au manganèse;

Les aciers au chrome;

Les aciers au tungstène ;

1. Voir la *Revue de Métallurgie*, 1904 et 1905, et les deux livres que nous avons publiés sur *les Aciers spéciaux*, Vve Dunod, éditeur.

Les aciers au molybdène;
Les aciers au vanadium;
Les aciers au silicium ;
Les aciers à l'aluminium.

Nous dirons quelques mots des aciers au cobalt, au titane et à l'étain.

L'important développement pris dans ces dernières années par les aciers spéciaux s'explique fort bien par les grands avantages qu'ils présentent.

Voici d'ailleurs comment M. Le Chatelier a défini leur supériorité (*Revue de Métallurgie*, novembre 1904) :

« Dans tous les aciers spéciaux destinés à la construction, le but de l'introduction d'éléments étrangers est toujours de diminuer la fragilité. On peut, par la trempe des aciers ordinaires à forte teneur en carbone, obtenir comme avec les aciers spéciaux des ténacités supérieures à 100 kilogrammes par millimètre carré; mais la fragilité de ces aciers durs est telle que l'on ne pourrait songer à les employer à la fabrication de pièces de machines toujours exposées à recevoir des chocs.

Aussi, avec les aciers au carbone seul, est-on obligé de se limiter à des métaux d'une nuance relativement douce, et, par suite, beaucoup moins durs.

Cette diminution de la fragilité dans les aciers spéciaux peut être utilisée de trois façons différentes :

1° *A dureté et fragilité égales*, on pourra diminuer considérablement, par comparaison avec les aciers ordinaires, le poids des organes de machines. C'est là un point d'importance capitale dans la construction des automobiles, où la légèreté est un des facteurs essentiels de la vitesse.

Cette diminution de poids entraîne de plus une économie dans le prix de revient qui compense, souvent au delà, le prix d'achat plus cher des aciers spéciaux.

2° *A poids et fragilité égaux*, on peut demander aux organes des machines des efforts bien plus considérables. On évite ainsi, dans le cas d'efforts accidentels exagérés, les chances

de déformations, qui suffisent parfois pour mettre complètement hors de service une machine.

3° Enfin, *à poids et dureté égaux*, on obtient une diminution énorme de fragilité et, par suite, une sécurité beaucoup plus grande contre les accidents, circonstance d'une importance capitale pour les automobiles et très profitable dans bien d'autres circonstances. »

ACIERS AU NICKEL

Étude théorique. — Courbes de refroidissement. — La détermination des points de transformation a été l'objet d'un grand nombre de recherches, au premier rang desquelles il faut placer celles de M. Osmond (*Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 30 janvier 1889).

On sait qu'on appelle *hystérésis* dans les courbes de refroidissement la différence qui existe entre les températures d'un point critique au chauffage et au refroidissement.

Le nickel accentue d'une façon considérable ce phénomène ; un acier à 4 0/0 de nickel présente une hystérèse de 100° pour le point de transformation magnétique. Pour 8 0/0 de nickel, l'hystérésis atteint 200° ; 480° pour 15 0/0 de nickel ; et 500° pour 25 0/0.

Ce sont donc des alliages *irréversibles ;* ils peuvent à une même température exister à l'état magnétique ou non magnétique, suivant le cycle des températures antérieures.

Voici les résultats obtenus par M. Osmond :

COMPOSITION				POINTS DE TRANSFORMATION MAGNÉTIQUE	
C	Ni	Si	Mn	AU REFROIDISSEMENT	A L'ÉCHAUFFEMENT
0,19	0,27	0,31	0,79	715 degrés	735 degrés
0,19	3,82	0,20	0,65	628 —	710 —
0,17	7,65	0,21	0,68	530 —	710 —
0,23	15,48	0,24	0,93	145 —	623 —
0,16	24,75	»	0,32	27 —	540 —
0,61	26,20	»	0,46	<0 —	»

Jusqu'ici nous n'avons considéré que les alliages renfermant moins de 25 0/0 de nickel.

Au-delà de cette teneur, il y a un changement très important : tous les alliages sont réversibles, les points de transformation à l'échauffement et au refroidissement différant à peine de 10°.

Voici les points de transformation obtenus par M. Osmond :

COMPOSITION			POINTS DE TRANSFORMATION MAGNÉTIQUE	
C	Ni	Mn	AU REFROIDISSEMENT	A L'ÉCHAUFFEMENT
0,23	31,44	0,49	124 degrés	138 degrés
0,46	35,70	0 28	232 —	276 —
0,30	43,04	0,68	357 —	401 —
0,11	58,30	0,38	523 —	557 —
0,68	69,20	0,41	557 —	590 —
0,07	76,75	0,68	545 —	582 —
0,12	88,95	0,38	457 —	488 —
0,09	92,20	0,74	415 —	450 —
0,10	94,70	0,86	388 —	425 —
0,12	98,50	0,55	345 —	384 —

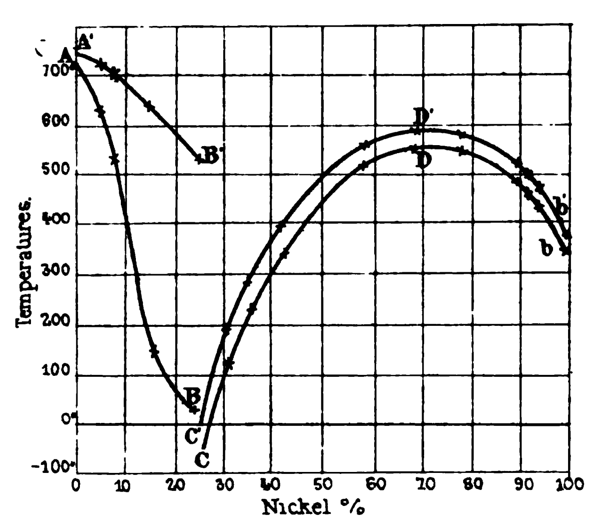


Fig. 88. — Points de transformation magnétique dans les aciers au nickel (Osmond).

Dans une note présentée à l'Académie des Sciences, le

3 juillet 1899, M. L. Dumas fit remarquer que les positions

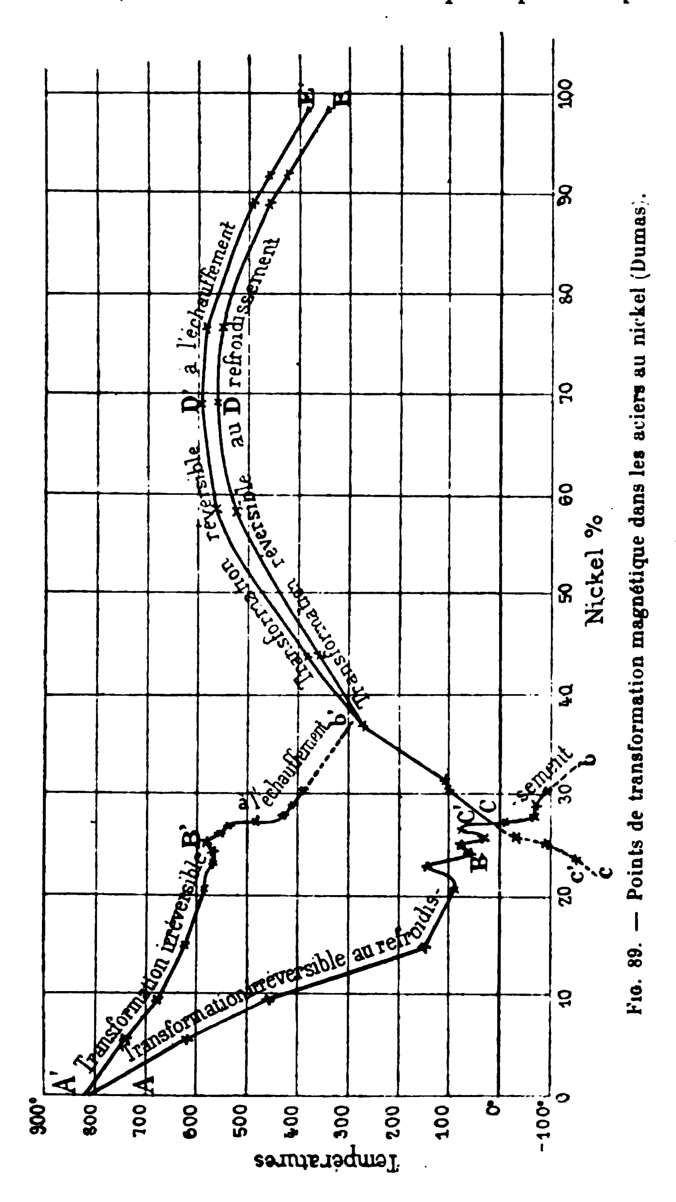


Fig. 89. — Points de transformation magnétique dans les aciers au nickel (Dumas).

des points de transformation magnétique ne dépendaient pas seulement de la teneur en nickel ; elles peuvent varier entre

des limites éloignées de plusieurs centaines de degrés, suivant les teneurs en carbone et en manganèse. La présence de ces deux éléments a pour effet d'abaisser de beaucoup les points de transformation.

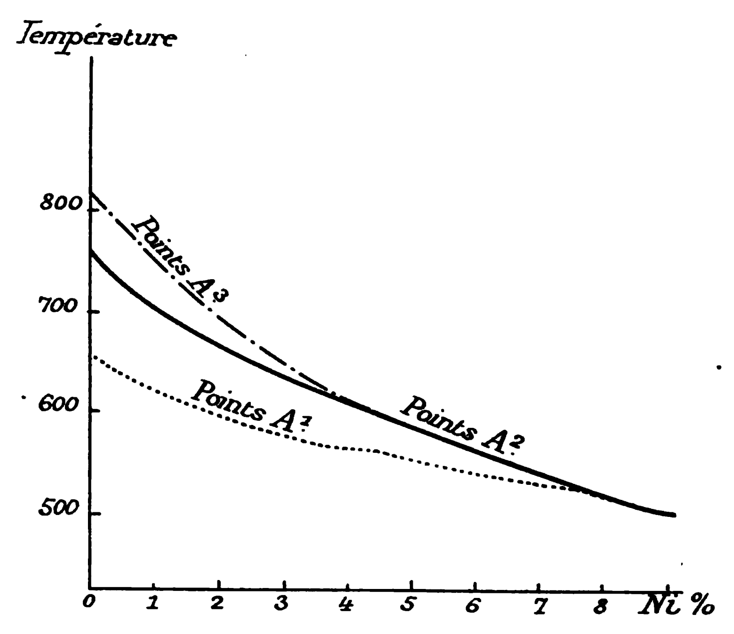


Fig. 90. — Points de transformation dans les aciers au nickel à faible teneur en carbone (Osmond).

Les résultats des recherches de M. Osmond sur le point de transformation magnétique peuvent être résumés dans la courbe ci-contre que nous avons déjà donnée dans l'*Étude théorique des Alliages* (*fig.* 88).

M. L. Dumas a, dans ses importantes recherches sur les aciers au nickel, fait ressortir différents points de haut intérêt, notamment que certains aciers subissent en même temps la transformation réversible et la transformation irréversible. Un acier à 27,72 0/0 de nickel, nous l'avons dit dans l'*Etude théorique des Alliages métalliques*, est sensiblement non magnétique à la température ordinaire; il est devenu magnétique

réversible dans la neige carbonique et magnétique irréversible dans l'air liquide.

C'est ainsi que M. Dumas a été conduit à prolonger les courbes déterminées par M. Osmond (*fig.* 89).

Les aciers au nickel, à faible teneur en carbone, possèdent, en dehors du point de transformation A_3, des points A_2 et A_1, comme les aciers au carbone.

Mais le nickel a une influence très notable sur la position de ces points; de plus, A_3 et A_2 se réunissent pour une teneur d'environ 4 0/0 de nickel, et A_1 lui-même semble disparaître pour 8 0/0 de nickel (*fig.* 90).

M. Osmond a étudié à ce point de vue différents échantillons préparés par M. Hadfield et renfermant environ 0,160 0/0 de carbone.

TENEUR EN NI 0/0	A_3	A_2	A_1
0	820	750	660
0,27	775-765	715-695	645-635
0,94	755-745	695-685	625-615
3,82	645-635		565-550
7,65		515-505	

Ces recherches sont résumées dans la figure 90.

En résumé, l'étude des points critiques des aciers au nickel montre leur subdivision nette en aciers irréversibles et en aciers réversibles.

Métallographie (Album, Pl. X à XIII, Phot. 37 à 52). — M. Osmond a montré, dans un mémoire publié en 1899, dans le *Bulletin de la Société des Ingénieurs civils de Londres*, que les aciers au nickel présentent tantôt la structure perlitique, tantôt la structure martensitique, ou enfin la structure polyédrique. On sait, d'autre part, que dans un mémoire paru en janvier 1900,

dans les *Annales des Mines*, M. Osmond, étudiant la cristallographie du fer, identifia la structure polyédrique à celle des aciers au nickel non magnétiques.

Les recherches que nous avons faites sur la micrographie des aciers au nickel ont porté sur trois séries d'aciers extrêmement purs.

Aciers à 0,120 *de carbone.* — Les aciers à 2,5 et 7 0/0 de nickel ont même structure que les aciers au carbone ordinaire. Mais la perlite est plus déliée que dans les aciers ordinaires à même teneur de carbone (Pl. X, Phot. 37).

Dans l'acier à 10 0/0, nous notons un changement de structure ; on voit apparaître la structure martensitique, caractérisée par trois directions. Mais il y a toujours des plages blanches qui sont formées de fer α.

Dans l'acier à 12 0/0, les plaques blanches n'existent plus, la martensite est sensiblement pure ; il en est de même pour l'acier à 15 et 20 0/0 (Pl. X, Phot. 38).

L'acier à 25 0/0 contient des plages blanches très importantes. C'est assurément le fer γ qui apparaît.

Puis, à 27 0/0, la structure devient polyédrique.

Avec les aciers contenant plus de 27 0/0 de nickel, on obtient toujours cette structure polyédrique (Pl. X, Phot. 39). Mais, au fur et à mesure que la dose de nickel augmente, on obtient des cristaux en quelque sorte plus déliés. Tandis qu'avec les aciers contenant de 27 à 30 0/0 de nickel, les grains se colorent aisément ; à partir de 35 0/0, ils ne se colorent plus. Le temps d'attaque nécessaire augmente très rapidement avec la teneur en nickel.

Pour les très hautes teneurs, il faut plusieurs heures (Pl. XI, Phot. 42).

De plus, à l'intérieur des polyèdres, on remarque de très nombreuses stries qui semblent indiquer des plans de clivage.

En résumé, pour cette première série, on trouve les trois groupes suivants :

Premier groupe, de 0 à 10 0/0 nickel : aciers semblables aux aciers de carbone ;

Deuxième groupe, de 10 à 27 0/0 de nickel : aciers à structure martensitique ;

Troisième groupe, plus de 27 0/0 de nickel : aciers à structure polyédrique.

De plus, le deuxième groupe doit subir les subdivisions suivantes :

De 10 à 12 0/0 de nickel : aciers formés de fer α et de martensite ;

De 12 à 20 0/0 de nickel : aciers formés de martensite sensiblement pure ;

De 20 à 27 0/0 de nickel : aciers formés de martensite et de fer γ.

Aciers à 0,250 *de carbone.* — De 0 à 7 0/0 de nickel, la structure est la même que pour les aciers au carbone ; les remarques que nous avons faites au sujet de la perlite paraissent se confirmer ici :

A 7 0/0, on semble apercevoir un peu de martensite.

A 10 0/0, elle est en quantité notable.

A 12 et 15 0/0, elle est en telle quantité et tellement fine qu'il nous a été impossible d'en faire un cliché qui puisse donner idée de la microstructure.

A 20 0/0, il y a de larges plages blanches.

A 25 0/0, on ne voit plus que des polyèdres ; il existe quelques cristaux en fer de lance.

Au-delà de la teneur de 25 0/0, on a toujours la même constitution polyédrique.

Ici on a donc encore trois groupes :

Premier groupe, de 0 à 7 0/0 nickel : aciers semblables aux aciers à carbone ;

Deuxième groupe, de 7 à 25 0/0 nickel : aciers à structure martensitique ;

Troisième groupe, plus de 25 0/0 nickel : aciers à structure polyédrique.

Comme dans la première série, le deuxième groupe se subdivise :

De 7 à 10 0/0 : aciers formés de fer α et de martensite ;

De 10 à 15 0/0 : aciers formés de martensite pure ;

De 15 à 20 0/0 : aciers formés de martensite et de fer γ.

Aciers à 0,800 0/0 *de carbone.* — De 0 à 5 0/0 de nickel, on note la même structure que pour les aciers au carbone ;

A 5 0/0, il semble y avoir un commencement de transformation ;

A 7 0/0, on obtient de la martensite (Pl. X, Phot. 40) ;

A 10 0/0, il y a de la martensite et du fer γ ;

A 12 0/0, les plages blanches augmentent. On a la même image que celle obtenue en trempant à 1.050° dans un mélange réfrigérant à —40° de l'acier à 1,40 de carbone.

A 15 0/0, il y a transformation de la structure : on ne voit plus que des polyèdres. Parfois, au milieu de ces polyèdres, on trouve des fers de lance.

Au-delà de 15 0/0 de nickel, la structure est toujours polyédrique. Les polyèdres montrent souvent des plans de clivage extrêmement accentués (Pl. XI, Phot. 41).

Le tableau suivant résume les caractéristiques micrographiques des aciers au nickel suivant leur teneur en carbone ; ils rentrent toujours dans les classes suivantes :

CLASSES	CARACTÉRISTIQUES MICROGRAPHIQUES	ACIERS A 0,120C	ACIERS A 0,250C	ACIERS A 0,800C
1re	Perlite	De 0 à 10 0/0 Ni	De 0 à 7 0/0 Ni	De 0 à 5 0/0 Ni
2e	Martensite pure	De 10 à 27 0/0 Ni	De 7 à 25 0/0 Ni	De 5 à 15 0/0 Ni
3e	Fer γ	Ni > 27 0/0	Ni > 25 0/0	Ni > 15 0/0

La deuxième classe doit être subdivisée, ainsi qu'il a été indiqué.

En résumé, les résultats obtenus, en observant la microstructure des aciers au nickel bruts de forge, sont les suivants :

1° Tous ces aciers peuvent être divisés en trois classes, ainsi que le montre le tableau précédent ;

2° Plus la teneur en carbone est grande, plus la teneur en nickel à laquelle la microstructure change est faible ;

3° Dans chaque série, le premier acier à structure polyédrique est non magnétique.

En somme, l'étude micrographique des aciers bruts de forge ou normaux [1] donne la vérification de l'importante loi, établie par M. Osmond, montrant l'équivalence du carbone de trempe, du nickel et du manganèse.

Nous avons d'ailleurs résumé ces recherches dans un diagramme très simple que nous allons décrire (*fig.* 91) :

Soient deux axes rectangulaires, l'un sur lequel sont portées les teneurs en carbone, l'autre sur lequel sont placées les teneurs en nickel, et supposons des alliages formés de fer, de carbone, de nickel.

Cherchons, pour les différentes teneurs en carbone, quels sont les premiers aciers qui présentent la structure martensitique et la structure polyédrique.

Nous entendons par acier à structure martensitique l'acier qui ne montre plus que de la martensite pure (il est, en effet, très difficile d'évaluer le moment où il commence à y avoir de la martensite).

Nous avons vu que, pour la série à environ 0,120 0/0 de carbone, le premier acier à structure martensitique est l'acier à 12 0/0 de nickel : il donne le point A ; pour la série à 0,800 0/0 de carbone environ, le premier acier à structure martensitique est l'acier à 7 0/0 de nickel : il est marqué en B.

Si nous traçons la droite AB (*fig.* 91), nous obtenons le lieu des points désignant les premiers aciers martensitiques de chaque série. Ceci a été vérifié par un grand nombre d'observations, comme nous l'expliquerons plus loin.

D'autre part, le premier acier polyédrique de la série contenant environ 0,120 de carbone est un acier qui renferme 27 0/0 de nickel et 0,125 de carbone.

Dans la série à environ 0,800 0/0 de carbone, le premier acier à structure polyédrique contient 15 0/0 de nickel et 0,796 de carbone.

Nous obtenons aussi les points A′ et B′ ; la droite A′B′ est le

1. Nous entendrons, avec M. Osmond, par acier normal, tout acier qui, ayant été porté à 900°, a été refroidi lentement.

lieu des points donnant les premiers aciers polyédriques et, par conséquent, les premiers aciers non magnétiques de chaque série.

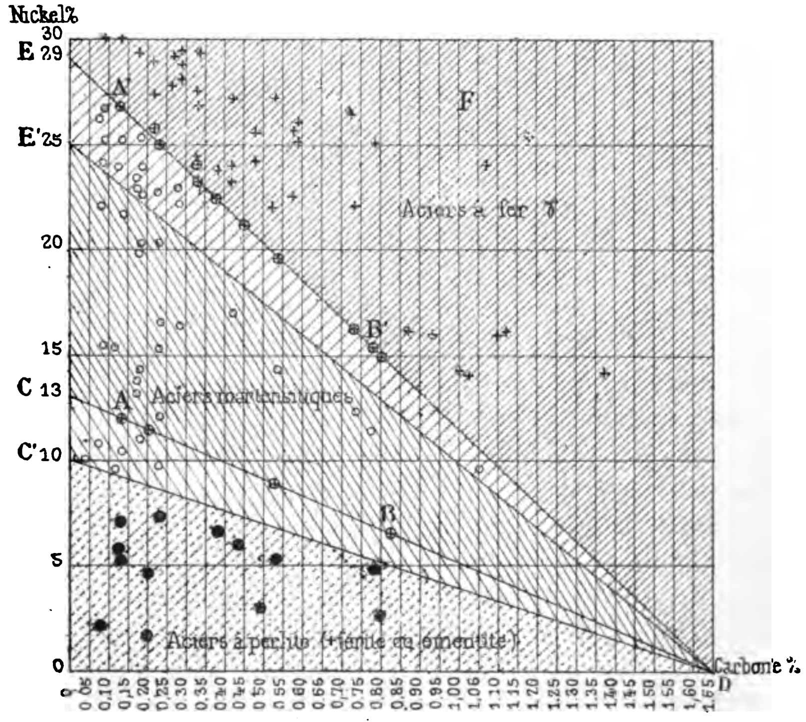


Fig. 91. — Diagramme des aciers au nickel.

Si nous prolongeons ces deux droites AB et A'B', nous voyons que :

1° Elles viennent toutes les deux rencontrer l'axe des X au point 1,650.

Ceci est extrêmement important : en effet, M. Osmond a montré que, dans les aciers au carbone, il était impossible d'obtenir de l'austénite, excepté si l'on trempe l'acier. Encore

faut-il tremper dans des conditions déterminées et n'obtient-on jamais d'austénite pure. M. Osmond a trouvé justement que le pourcentage de carbone qui permettait d'obtenir la quantité maximum d'austénite était 1,650[1] ;

2° AB rencontre *oy* au point 13, tandis que A'B' rencontre le même axe au point 30.

Il s'agissait de vérifier que les deux droites indiquées donnaient bien les points correspondant aux premiers aciers martensitiques ou polyédriques de chaque série.

Pour le faire, nous avons employé deux méthodes :

1° Nous avons observé un grand nombre d'aciers qu'ont bien voulu mettre à notre disposition les grandes forges, notamment la Société Commentry-Fourchambault, qui nous a fourni plus de cent échantillons;

2° D'autre part, nous avons procédé comme suit : nous avons pris des aciers aussi pauvres que possible en carbone et dont la teneur en nickel variait de 0 à 25 0/0, et nous les avons cémentés de façon que la couche superficielle présentât soit l'aspect martensitique, soit l'aspect polyédrique sous la plus faible épaisseur possible.

Au tour, nous enlevions la couche superficielle sous une épaisseur de 1/4 de millimètre et l'on y faisait le dosage du carbone.

Ces dernières expériences sont évidemment très longues, étant donnés les tâtonnements qui sont nécessaires pour arriver juste à la structure désirée. Aussi n'en avons-nous pratiqué que quelques-unes.

Ces deux séries d'expériences nous ont donné des résultats d'une concordance remarquable. Tous les points marqués sur la figure représentent les aciers que nous avons observés. On voit combien ces expériences concordent avec la théorie.

Les aciers particulièrement intéressants à étudier étaient les aciers se trouvant sur l'une des droites limites.

Leur reconnaissance est assez facile ; pour ceux qui ne sont formés que de martensite, on ne voit aucune plage blanche

1. Nous avons vu (p. 141) que ce point a été retrouvé par M. Bénédicks.

non orientée (j'insiste sur ce point) ; il est bien évident d'ailleurs qu'il en est de même pour tous les aciers à martensite pure; mais, pour un acier limite, si on le décarbure tant soit peu (un recuit d'une heure à 900° en présence d'oxyde de fer est à peine nécessaire), on voit apparaître sur les bords des taches blanches de fer α qui ne présentent aucune orientation.

Pour les aciers qui se trouvent sur la limite entre les aciers martensitiques et les aciers polyédriques, l'indication donnée par la microstructure est beaucoup plus certaine. En effet, on voit presque toujours des polyèdres très nets et sur les bords de ceux-ci quelques fers de lance très noirs.

D'ailleurs, si l'on a des doutes, quelques coups de marteau sur l'acier ou une trempe, ou, mieux encore, un refroidissement à — 10° suffira pour faire apparaître de nouveaux fers de lance blancs ou noirs. C'est ainsi que les différents aciers marqués d'une croix entourée d'un cercle ont été trouvés sur la limite des différents groupes.

Enfin, nous avons voulu vérifier les points qui se trouvent sur l'axe des Y ; pour cela, il nous fallait obtenir des aciers sans traces de carbone ; à cet effet, nous nous sommes adressés à l'alumino-thermie : nous avons réduit différents mélanges d'oxyde de fer et de nickel par l'aluminium. Après de nombreux tâtonnements, nous sommes arrivés à abaisser l'aluminium contenu dans ces alliage à 2 0/0 environ.

Nous avons ainsi préparé une série de produits dans lesquels on voit nettement la structure des alliages fer-nickel.

En rapportant les proportions trouvées à l'analyse à un alliage formé seulement de fer et de nickel, nous sommes arrivés à conclure que :

A 26,25 de nickel on a de la martensite très nette, plus du fer γ.

A 28,40 des polyèdres nettement formés ; mais au centre de la martensite très fine.

Dès les environs de 30 0/0 de nickel, il n'y a plus que des polyèdres très nets.

Ce diagramme divise donc le plan en trois espaces :

Le triangle CDO, correspondant aux aciers ayant sensiblement les mêmes propriétés que les aciers au carbone ordinaire, mais avec une résistance et une limite élastique un peu su-

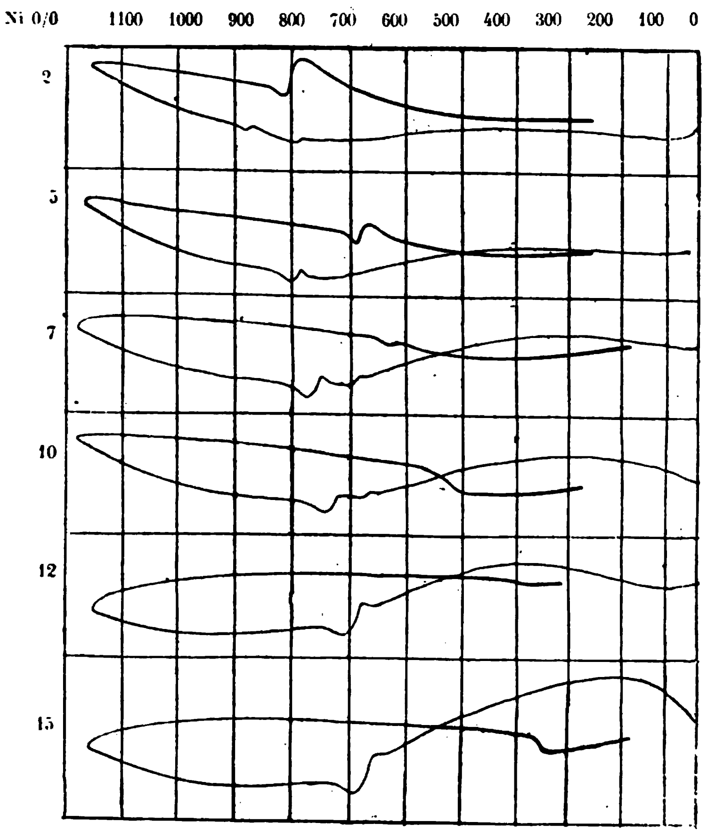


Fig. 92. — Thermo-électricité des aciers au nickel (Boudouard).

périeures, et surtout avec une homogénéité bien plus grande.

Le triangle CDE correspondant aux aciers à structure martensitique ayant des propriétés analogues aux aciers contenant des quantités importantes de carbone et trempés; ces aciers sont extrêmement durs, difficiles à travailler et sont fragiles;

L'espace EDF qui correspond à des aciers qui ont des propriétés nouvelles, à basse limite élastique, ne possédant aucune fragilité, etc.

Mais il y a en plus des zones de passage qui ont leur im-

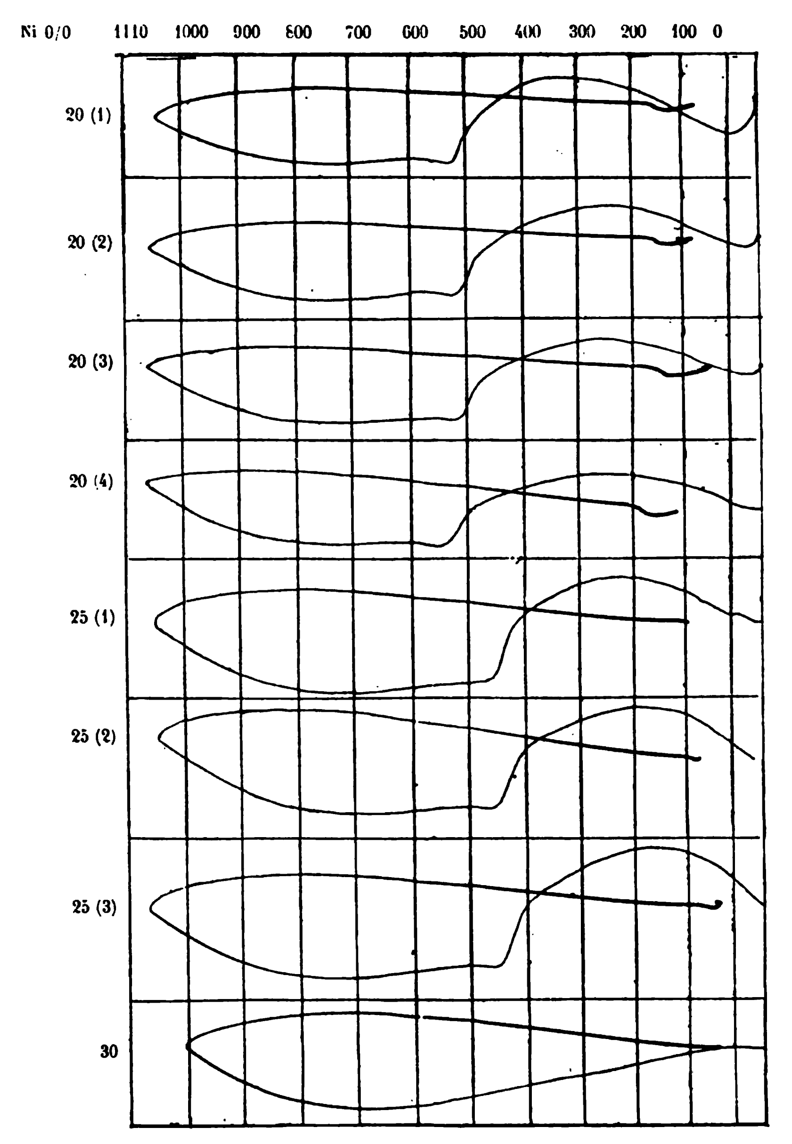


Fig. 93. — Thermo-électricité des aciers au nickel (Boudouard).

portance. C'est ainsi que, dans le triangle CDC′, déterminé par la droite qui joint le point D au point 10 de nickel, on a des

aciers qui sont formés de perlite et de martensite. Ces aciers ont une partie des propriétés des aciers de l'espace CDE.

De même, dans le triangle EDE′ on a des aciers qui sont formés de martensite et de fer γ et qui ont par conséquent

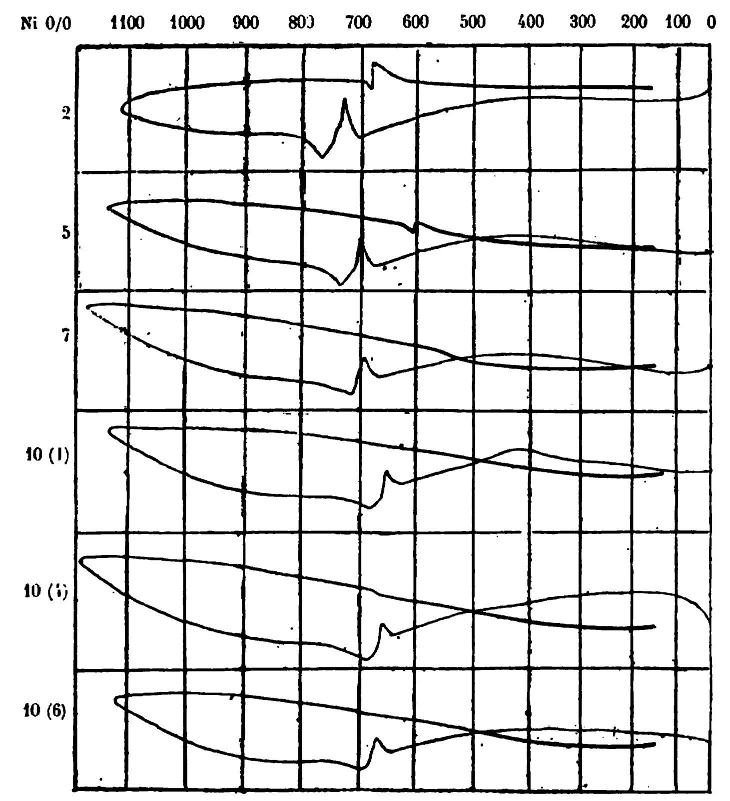


Fig. 94. — Thermo-électricité des aciers au nickel (Boudouard).

une partie des propriétés des aciers situés dans la zone EDF.

En résumé, nous avons pour les aciers au nickel un diagramme extrêmement simple, qui n'est en quelque sorte que la traduction des expériences que nous avons faites. Ce diagramme divise le plan en trois parties auxquelles correspondent des aciers ayant des propriétés particulières.

Mais il faut tenir compte des deux zones secondaires que nous avons indiquées et qui constituent en quelque sorte les

termes de passage d'une catégorie d'aciers à la voisine

Résistance électrique. — M. H. Le Chatelier a fait des déterminations de résistance électrique sur les aciers au nickel. Ce savant a trouvé que le déplacement des points de transformation varie d'une façon continue avec la composition de l'alliage et ne se dédouble pas. Les alliages fer-nickel ne sont pas constitués par une combinaison de ces métaux juxtaposés à un excès de l'un ou de l'autre d'entre eux, mais forment un mélange chimiquement homogène, un mélange isomorphe.

Thermo-électricité. — Nous avons déjà résumé les travaux de M. Boudouard qui, en utilisant une méthode particulière, a déterminé les points de transformation des aciers que nous avons employés dans les essais micrographiques.

Voici les résultats obtenus sur les aciers que nous avons utilisés dans nos recherches et quelques-unes des courbes enregistrées (*fig.* 92, 93 et 94) :

COMPOSITION		REFROIDISSEMENT	
CARBONE	NICKEL	ÉCHAUFFEMENT	REFROIDISSEMENT
0,07	2,23	860 — 775 — 725	830 — 710 peu visible.
0,125	5,23	770 — 695	710
0,125	7,13	690 — 660	650
0,132	10,10	675 — 650	575
0,125	12,07	640 — 610	420
0,110	15,17	620	360
0,176	20,40	600	300
0,160	25,85	510	175
0,120	30,00	»	»
0,800	2,20	705	695
0,776	4,90	675	625
0,815	7,09	665	560
1,050	9,79	625	»
0,760	12,27	625	»
0,796	15,04	590	»
0,800	20,01	560	»
0,790	25,06	515 peu visible.	»
0,810	29,96	»	»

Magnétisme. — Il a été fait d'importantes recherches sur le magnétisme des aciers au nickel.

Nous citerons tout d'abord les célèbres recherches d'Hopkinson. C'est ce savant qui montra pour la première fois l'existence de la transformation allotropique dans certains aciers au nickel.

Le 2 décembre 1889, il décrivait à la Société Royale de Londres les remarquables propriétés d'un acier à 25 0/0 de nickel qui avait été préparé aux usines de la Société *Steel of*

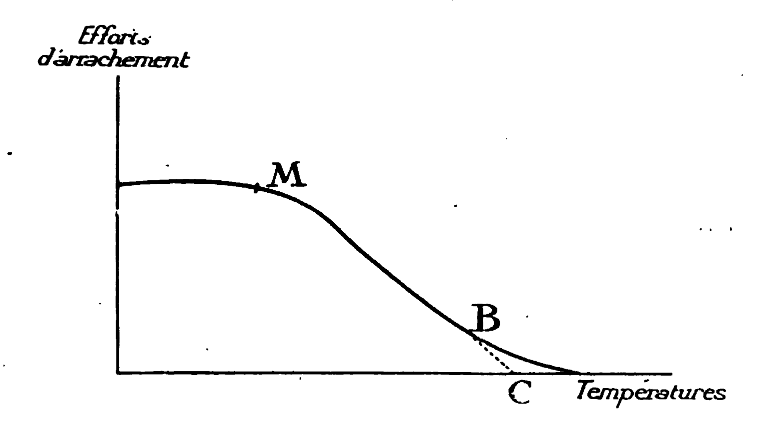


Fig. 95. — Magnétisme des aciers au nickel (Guillaume).

Scotland à Glascow, par Riley. Cet alliage était non magnétique à la température ordinaire; mais il devenait magnétique un peu au-dessous de 0° et très magnétique à la température de — 50°. De plus, lorsqu'on le ramenait à la température ordinaire, l'acier restait magnétique; il ne perdait son magnétisme qu'à une température de 580°.

En janvier 1890, Hopkinson montrait à la même Société savante que, à ces deux variations allotropiques, correspondent des résistances électriques et des propriétés mécaniques différentes.

M. Guillaume a, d'autre part, étudié la variation de l'effort d'arrachement d'un électro-aimant suspendu à un barreau d'acier au nickel réversible porté à des températures croissantes. L'effort, d'abord constant, décroît ensuite assez

rapidement, et cela proportionnellement à la température. Il atteint bientôt une valeur très faible et tend alors très lentement vers 0. On obtient une courbe analogue à celle de la figure 95.

M est le point de commencement de transformation ; celle-ci n'est pas encore terminée en B.

En pratique, il y a perte de magnétisme en C, point où la ligne MB prolongée rencontre l'axe des x.

Les expériences de M. Guillaume, qui ont été poursuivies jusqu'à la température de 320° sur des aciers renfermant moins de 40 0/0 de nickel, ont montré que la température θ définissant le point C est donnée par la formule :

$$\theta = 34,1\,(n - 26,7) - 0,80\,(n - 26,7)^2,$$

n étant la proportion de nickel pour 100.

Cette formule ne s'applique, bien entendu, qu'aux alliages renfermant moins de 25 0/0 de nickel.

DILATATION. — M. Ch.-Ed. Guillaume a déterminé la variation de la dilatation avec le pourcentage en nickel. Ces recherches sont résumées dans le diagramme (*fig.* 96). Il n'est question que d'aciers peu carburés.

A partir de 28 0/0 de nickel et jusqu'à 45 0/0 de nickel, on trouve une anomalie négative de dilatation dont le minimum a lieu entre 35 et 36 0/0 de nickel.

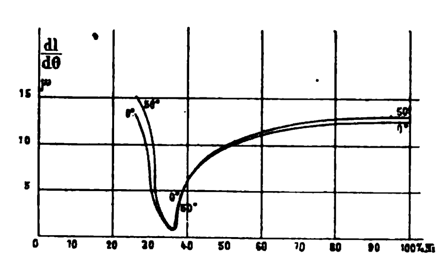


FIG. 96. — Dilatations des aciers au nickel (Guillaume).

ÉTUDE CHIMIQUE. — MM. Carnot et Goutal ont montré que, dans l'attaque des aciers au nickel par le réactif cupropotassique neutre, le nickel disparaît. Le même fait a été observé avec une série de réactifs. Le fer et le nickel entrent simultanément en solution aussi bien pour les aciers trempés que pour les aciers refroidis. Le nickel semble donc se trouver à l'état de dissolution ou de mélange et non pas à l'état d'alliage défini.

PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES. — Nous verrons plus loin, lorsque nous étudierons les propriétés des aciers au nickel, que leurs propriétés mécaniques éprouvent des changements brusques correspondant nettement aux transformations indiquées par la microstructure.

Étude industrielle. — FABRICATION. — La fabrication des aciers au nickel se fait soit au four Martin, soit au four à creuset. La matière première est le nickel métallique ou des déchets d'acier au nickel.

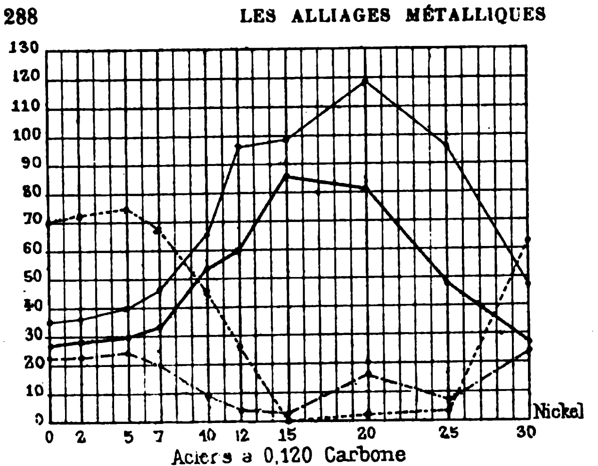
Cette fabrication comporte quelques difficultés ; il est vrai que le nickel ne se perd pas ; mais l'appréciation de la teneur en carbone au moyen d'éprouvettes prélevées suivant les méthodes ordinaires est extrêmement délicate et demande une véritable éducation, et cela pour chaque teneur en nickel.

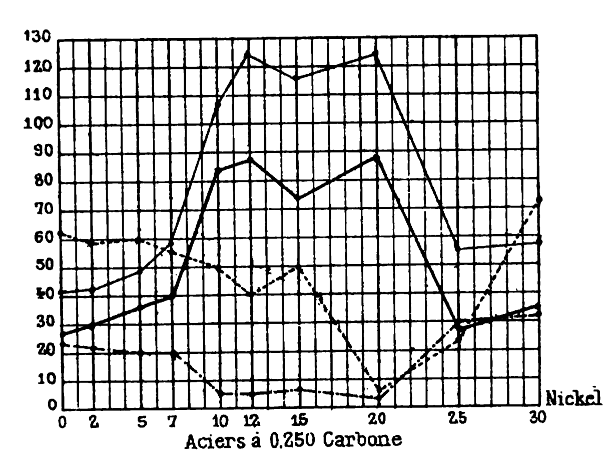
On prépare des aciers à toutes teneurs en nickel depuis 0,5 et 1 0/0 de nickel jusqu'à 36 (acier invar d'Imphy) et 46 à 50 0/0 (acier platinite d'Imphy). Certaines usines font même des produits renfermant 90 à 92 0/0 de nickel.

PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES. — Les propriétés des aciers au nickel ont été étudiées par un grand nombre de métallurgistes. Rappelons notamment les études de MM. Hadfield, Dumas, etc., sur les propriétés mécaniques.

Nous résumerons rapidement les recherches que nous avons faites et dans lesquelles nous avons utilisé des essais à la traction, au choc (méthode de Frémont) et à la dureté (méthode de Brinell).

Les résultats obtenus sont résumés dans les diagrammes des figures 97, 98, 99, 100 et 101. Les essais à la traction montrent que tout d'abord la charge de rupture et la limite d'élasticité vont en augmentant petit à petit, tandis que les allongements et les strictions décroissent peu à peu. Puis subitement la charge de rupture et la limite d'élasticité atteignent des valeurs extrêmement élevées que l'on rencontre à peine dans les aciers au carbone riches en cet élément et trempés ; par contre, les allongements et les strictions sont extrêmement faibles et





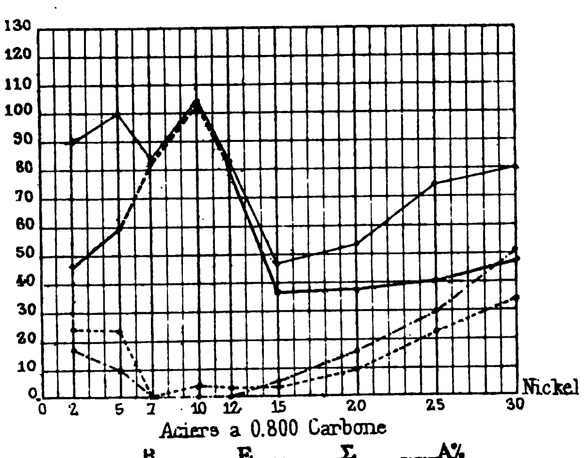


Fig. 97, 98 et 99. — Essais à la traction sur les aciers au nickel normaux.

même nuls. Ces différentes caractéristiques se maintiennent ainsi entre certaines teneurs en nickel; puis, subitement encore, cette teneur allant en augmentant, les allongements et les strictions reprennent une valeur élevée, alors que la limite d'élasticité et la charge de rupture s'abaissent considérablement.

Trois groupes s'imposent :

Le premier, dans lequel les valeurs de la résistance à la rupture, etc., sont voisines de celles des aciers au carbone, bien qu'un peu supérieures ;

Le deuxième, pour lequel les

caractéristiques trouvées sont sensiblement les mêmes que

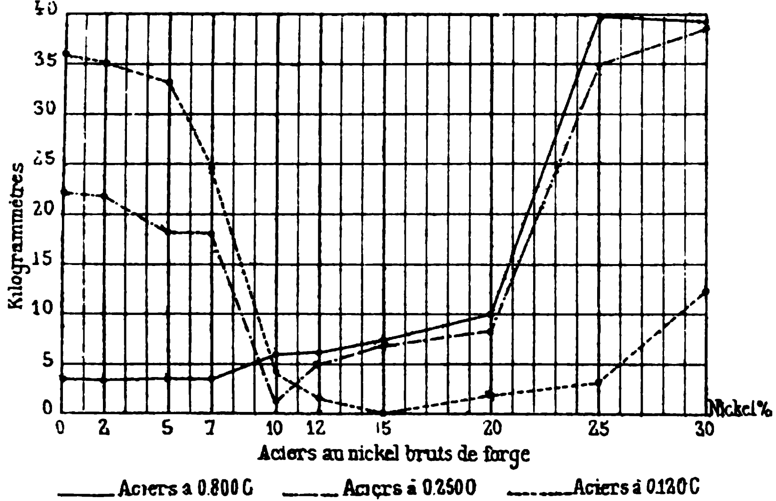


FIG. 100. — Essais au choc (méthode Frémont) sur les aciers au nickel.

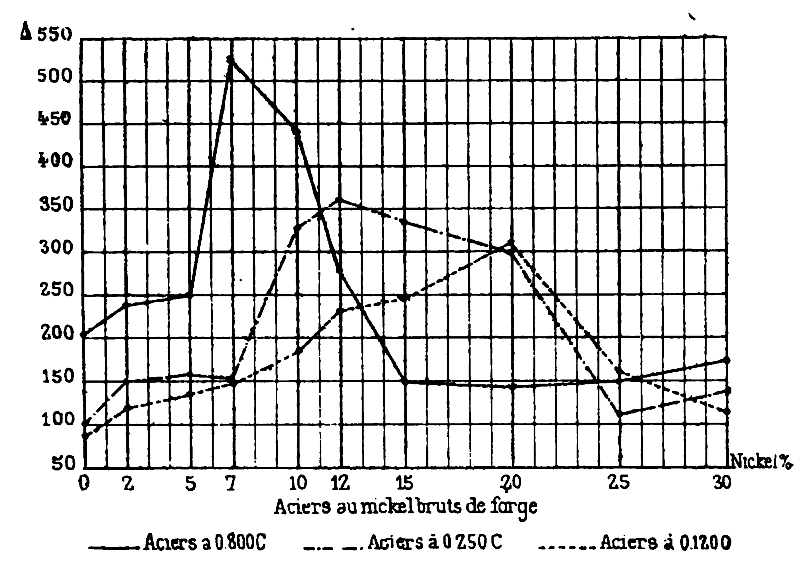


FIG. 101. — Essais à la dureté (méthode Brinell) sur les aciers au nickel.

pour les aciers ordinaires à 0,850 0/0 C, trempés, cependant, avec une amplification plus ou moins grande ;

Le troisième, qui correspond à des propriétés toutes nouvelles rapprochant ces aciers de certains métaux, tels que le cuivre, le nickel, etc.

En faisant varier la teneur en carbone dans diverses séries, on retombe toujours exactement sur la classification précédente.

Enfin, dans l'étude de la dureté et de la fragilité (*fig.* 100 et 101) de ces mêmes aciers, on retrouve encore les trois groupes déjà indiqués, la dureté et la fragilité atteignant leur maximum pour les aciers à martensite pure.

Nous ajouterons encore quelques remarques.

Le maximum de dureté dépend de la somme C + Ni ; il est atteint pour une dose de nickel d'autant plus faible qu'il y a plus de carbone.

Mais le point certainement le plus intéressant à signaler est le suivant : les aciers austénitiques ne sont pas fragiles, même lorsqu'ils contiennent de grandes quantités de carbone.

C'est ainsi que les aciers à 25 et 30 0/0 de nickel et contenant 0,800 de carbone donnent de 35 à 40 kilogrammes à l'appareil de M. Frémont.

Parmi les propriétés des aciers au nickel autres que les propriétés mécaniques, nous citerons la grande résistance qu'opposent à l'oxydation les alliages renfermant plus de 30 0/0 de nickel et la dilatation extrêmement faible qu'éprouvent les aciers renfermant aux environs de 36 0/0 de nickel.

Influence des traitements (Album, Pl. XI à XII). — *Trempe.* — M. Dumas, envisageant l'influence de la trempe sur la position des points de transformation des aciers au nickel proprement dits, arrive aux conclusions suivantes : de 0 à 21 0/0 de nickel la trempe n'a pas d'effet sur les points critiques. De 21 à 27 0/0 il y a un relèvement notable du point de transformation à l'échauffement et relèvement considérable du point de transformation au refroidissement. De 27 à 29 0/0 on note un relèvement notable du point de transformation à l'échauffement et relèvement très considérable du point de transformation au refroidissement.

Pour les teneurs en nickel supérieures à 31 0/0, les points de transformation, qui, on le sait, sont très rapprochés, se trouvent légèrement abaissés. Du fait que la trempe relève les points de transformation, certains aciers non magnétiques à la température ordinaire peuvent devenir magnétiques après trempe.

Voici le résumé très succinct des expériences que nous avons faites sur ce sujet :

1° Lorsque l'on trempe des aciers au nickel sans les avoir portés à une température supérieure au point de transformation à l'échauffement, il n'y a aucun changement dans la microstructure ;

2° Les aciers portés à une température supérieure au point de transformation à l'échauffement subissent les mêmes transformations, qu'ils soient trempés à cette température ou au cours du refroidissement avant d'avoir atteint le point de transformation au refroidissement. Ces faits étaient d'ailleurs faciles à prévoir.

Dans ces derniers cas, on obtient les résultats suivants au point de vue micrographique :

1° Les aciers perlitiques subissent les mêmes transformations que les aciers au carbone.

On trouve de la martensite après trempe ;

2° Les aciers martensitiques montrent une tendance à la structure polyédrique. Une partie du fer doit passer à l'état γ, (Pl. XI, Phot. 43) ;

3° Les aciers polyédriques présentent deux cas : les premiers aciers de cette classe subissent une transformation très nette, caractérisée par des cristaux en fers de lance rappelant ceux obtenus par une trempe vive dans les aciers à teneur élevée en carbone (Pl. XI, Phot. 44).

Pour les aciers plus riches en nickel, la trempe n'a plus aucune influence sensible sur le point de transformation. La structure reste toujours polyédrique ; mais les cristaux paraissent plus déliés.

Au point de vue mécanique, la trempe augmente, bien entendu, la charge de rupture et la limite élastique pour les

aciers du premier groupe. Le même fait est à noter sur les premiers aciers du second groupe ; ceci s'explique d'ailleurs très aisément ; avant trempe ces aciers sont formés de fer α + martensite ; après trempe, de martensite pure.

Les aciers du second groupe, plus riches en nickel, ne sont pas transformés par trempe.

Les plus riches en nickel sont cependant adoucis ; ils renferment, après trempe, un peu de fer γ.

Quant aux aciers du troisième groupe, ils sont généralement un peu adoucis par trempe. Exception faite toutefois, pour les premiers aciers de ce groupe, qui sont transformés par trempe et donnent alors une plus forte charge de rupture et une limite élastique plus élevée qu'avant le traitement.

La trempe n'a généralement pas d'influence sensible sur la fragilité et la dureté, à l'exception cependant des aciers perlitiques qui subissent sensiblement les mêmes transformations que les aciers au carbone ordinaires et les premiers aciers à fer γ qui sont légèrement martensitiques après trempe.

Il faut toutefois bien noter (et nous tenons à insister sur ce point) que l'élément nickel[1] intervient dans les propriétés de la martensite. En effet, si l'on considère des aciers à 0,120 0/0 de carbone renfermant de 0 à 10 0/0 de nickel, lesquels sont formés de perlite, si on les trempe à température élevée de façon à produire de la martensite et si on les essaie ensuite à la fragilité, on trouve que celle-ci est bien supérieure à celle des aciers à même dose de carbone trempés, lesquels pour 0,120 0/0 C donnent environ 36 à 40 kilogrammes et que, de plus, cette fragilité est en quelque sorte proportionnelle à la quantité de nickel contenu. D'autre part, si l'on considère les aciers renfermant 0,120 0/0 de carbone et de 10 à 25 0/0 de nickel, on voit qu'ils sont tous très fragiles ; ils sont martensitiques ; mais les aciers à 0,120 0/0 de carbone et ne renfermant pas de nickel ne sont nullement fragiles après trempe.

1. Il en est de même pour le manganèse, le chrome, le tungstène, etc.

Les différents éléments interviennent pour donner des qualités diverses à la solution solide qu'est la martensite.

Recuit. — M. Dumas a montré que le recuit a des effets analogues à la trempe; il tend à diminuer l'hystérésis, c'est-à-dire que, après le recuit, la distance séparant les deux points de transformation (échauffement et refroidissement) tend à devenir moindre.

Ceci indique que par le recuit comme par la trempe les aciers ayant des points de transformation voisins de la température ordinaire peuvent de non magnétiques devenir magnétiques.

Les premiers aciers polyédriques seuls sont atteints par le recuit au point de vue microstructure; ils donnent des fers de lance semblables à ceux obtenus dans la trempe (Pl. XII, Phot. 45 et 46).

Mais le recuit atteint des aciers à plus forte teneur en nickel que la trempe.

Écrouissage. — Dès les premiers jours où l'on a utilisé des aciers au nickel non magnétiques, on s'est aperçu que l'on obtenait des copeaux magnétiques.

M. Dumas a montré qu'en effet l'écrouissage a sur ces aciers même effet que la trempe.

Partant de ce principe, nous devions donc trouver que les premiers aciers polyédriques, ayant leur point de transformation au refroidissement voisin de la température ordinaire, subissent, du fait de l'écrouissage, d'importants changements dans leur microstructure. Les résultats que nous avons obtenus sont certainement remarquables de netteté. Dans ces expériences, nous avons utilisé des aciers ayant pour composition:

C........................	0,250 0/0
Ni........................	25 0/0

et

C........................	0,800 0/0
Ni........................	15 0/0

Tout d'abord, nous avons noté que la structure est nette-

ment à fers de lance après l'écrouissage ; toutefois, quelques polyèdres subsistent.

De plus, les points les plus intéressants sont les suivants :

1° Plus l'écrouissage est prononcé, plus il y a de fers de lance et plus aussi l'acier est facile à attirer à l'aimant ;

2° Le premier effet de l'écrouissage est d'accentuer en quelque sorte les plans de clivage qui sont indiqués dans chaque polyèdre, et il semble s'effectuer une séparation suivant ces différents plans.

Un fait analogue a été signalé par M. Charpy pour les laitons. Il paraît bien que c'est là le premier temps de la transformation de l'austenite en fer de lance.

En effet le développement des fers de lance se limite nettement aux bords du polyèdre (Voir les photographies 47 et 48, Pl. XII). Sur l'une des photographies, les différents fers de lance sont limités à l'une des lignes du polygone à un point tel que l'on croirait que la moitié de la figure a été cachée pour être photographiée.

D'autre part, les plans de clivage paraissent quelquefois se briser et donner des fers de lance.

Refroidissement. — Les travaux de MM. Hopkinson, Dewar, Fleming, Osmond et Dumas ont montré que certains aciers au nickel sont transformés par refroidissement. Ils voient par ce traitement augmenter considérablement leur limite élastique et leur charge de rupture, tandis que leurs allongements diminuent non moins nettement.

M. Dumas conclut : « Tous les échantillons transformés accusent les propriétés mécaniques caractéristiques des aciers dont le point de transformation irréversible au refroidissement est situé au-dessus de la température ordinaire. »

Nous avons étudié l'influence de températures de plus en plus basses jusqu'à environ — 180° (air liquide) sur les aciers au nickel. Seuls les premiers aciers polyédriques sont atteints dans leur microstructure. De polyédriques ils deviennent martensitiques et montrent des fers de lance d'autant plus abon-

dants, du moins jusqu'à une certaine limite, que le refroidissement a été plus important (Phot. 49 et 50, Pl. XIII).

Il est à remarquer d'ailleurs — et ce fait a été signalé pour la première fois par M. Osmond qui l'a décrit dans le *Metallographist* (en octobre 1899) — que, si l'on trempe dans le bain une surface préalablement polie, on obtient une vue très nette au microscope, et cela sans aucune attaque; la transformation se fait avec augmentation de volume (Phot. 51, Pl. XIII).

Enfin il faut une température d'autant plus basse pour amener un commencement de transformation que l'acier renferme plus de nickel (Phot. 52, Pl. XIII).

Cémentation. — Les résultats obtenus par la cémentation des aciers au nickel découlent très nettement du diagramme que nous avons exposé plus haut. Mais il ne faut pas oublier que, pendant la cémentation, il se fait un véritable recuit qui peut, dans certains cas, avoir des influences très spéciales, ainsi que nous l'avons dit.

Lorsque l'acier cémenté (toujours à faible teneur en carbone, 0,120 environ) renferme peu de nickel, on obtient les mêmes résultats que dans les aciers au carbone ordinaire, c'est-à-dire que le bord est perlitique et renferme de la cémentite, si la cémentation est assez importante.

Lorsque la teneur en nickel est plus élevée aux environs de 7 0/0, l'âme est perlitique, le bord est martensitique.

Nous donnerons plus loin quelques détails sur ce point particulièrement intéressant.

Pour une teneur en nickel plus grande, 15 0/0 par exemple, on rencontre au centre de la martensite, plus loin de la martensite, et du fer γ aux bords des polyèdres.

Enfin, avec des pourcentages très élevés en nickel, tels que 40 0/0, on ne trouve toujours que du fer γ.

Mais, si l'on utilise un acier qui, par simple recuit, devient martensitique, par exemple un acier à 30 0/0 de nickel, l'âme, qui était d'abord polyédrique, devient martensitique par le recuit qui s'opère pendant la cémentation.

Utilisations. — Première classe : *Aciers perlitiques.* — Ces aciers ont une charge de rupture d'autant supérieure à celle d'un acier ordinaire à même teneur en carbone que leur teneur en nickel est plus élevée; mais la différence ne dépasse guère 10 kilogrammes au maximum. Il en est de même de la limite élastique. Les allongements et les strictions ne présentent pas grande variation.

La résistance au choc est relativement très élevée; les aciers renfermant de 0,100 à 0,200 0/0 de carbone nous ont toujours donné de 30 à 40 kilogrammes.

Enfin, la dureté semble croître, mais très légèrement, avec la dose de nickel.

Deuxième classe : *Aciers martensitiques.* — Ces aciers sont caractérisés par :

1° Leur haute charge de rupture (elle peut atteindre 170 kilogrammes par millimètre carré);

2° Leur limite élastique élevée (80 à 100 kilogrammes par millimètre carré);

3° Leurs faibles allongements et striction ;

4° Leur résistance moyenne au choc;

5° Leur grande dureté.

Notre attention a été particulièrement attirée sur la résistance moyenne au choc de ces aciers. En effet, certains de ces aciers donnent de 5 à 7 kilogrammes. Il est, de plus, à remarquer que ce ne sont pas les aciers les plus riches en carbone qui donnent la plus haute résistance à la rupture. C'est ainsi qu'un acier renfermant 0,250 C et 12 0/0 Ni nous a donné R = 150 kilogrammes, tandis qu'un acier renfermant 0,800 C et 10 0/0 Ni a donné R = 105 kilogrammes.

Troisième classe : *Aciers polyédriques.* — Ces aciers sont caractérisés, comme l'a démontré la remarquable étude de M. Dumas, par :

1° Une charge de rupture et une limite élastique moyennes;

2° De très grands allongements et de très belles strictions;

3° Une résistance au choc remarquable, qui dépasse même parfois 40 kilogrammes;

4° Une dureté peu élevée.

Il est à remarquer que ces propriétés sont sensiblement constantes, et cela quelles que soient la teneur en carbone et la teneur en nickel.

Nous tenons à développer de suite l'intéressante application que présentent certains aciers au nickel autres que le 2 0/0 au point de vue cémentation.

Si nous nous reportons au diagramme que nous avons établi pour ces aciers, nous voyons qu'un acier à 2 0/0 de nickel cémenté de façon que le bord contienne environ 1 0/0 de carbone sera perlitique; mais que, si nous arrivons à 7 0/0 de nickel, le bord de l'acier sera martensitique, tandis que l'âme reste perlitique.

Examinons de suite l'intérêt industriel que présente cette question. On sait que la martensite est le constituant des aciers trempés.

Si donc on prend une pièce faite en acier à 7 0/0 de nickel et si on la cémente de façon que la couche extérieure ait une teneur en carbone d'environ 1 0/0, on aura facilement une pièce dont l'âme sera perlitique et dont les bords seront martensitiques.

En un mot, la périphérie aura même constitution que si l'acier avait été trempé, tandis que l'âme est encore perlitique.

Donc, si l'on cémente convenablement une pièce faite en acier extra-doux à 7 0/0 de nickel, on lui communique sensiblement les mêmes propriétés que si elle avait été cémentée, puis trempée.

Je n'insisterai pas, ici, sur la grande importance de ce procédé qui est, en France comme à l'étranger, la propriété des usines de Dion-Bouton. En prenant les précautions voulues, notamment en ayant soin de faire un refroidissement aussi lent que possible des pièces cémentées, on arrive à supprimer toutes les opérations qui accompagnent la trempe, telles que le redressement, la rectification, etc.

Supposons maintenant que cet acier extra-doux à 7 0/0 de nickel soit cémenté plus profondément, de façon, par exemple,

que la périphérie soit à 1,50 0/0 de carbone, et suivons sur le diagramme ce que nous devons avoir; nous trouverons toujours au centre de la perlite, puis, plus loin, de la martensite mélangée tout d'abord de fer α; cette martensite deviendra compacte, puis sera mélangée d'un peu de fer γ; enfin, on trouvera du fer γ pur.

Si nous examinons chaque zone au point de vue mécanique, nous voyons que le centre à perlite ne sera pas fragile, la couche martensitique aura une très grande dureté, et enfin la surface présentera une qualité particulièrement précieuse, celle de se polir avec une grande facilité, et cela sans usure.

Nous avons pensé que cet autre mode de cémentation pourrait être mis au point, industriellement parlant, et nous avons entrepris dans ce sens d'importantes expériences sur des pièces soumises au frottement. Elles ne sont pas encore assez avancées pour que nous puissions en rendre compte.

En résumé, l'étude de la cémentation des aciers au nickel nous a conduit à un procédé industriel de préparation de pièces qui, par simple cémentation, acquièrent des propriétés particulièrement précieuses.

Les types d'aciers au nickel actuellement les plus usités sont les suivants :

1°	C....................	0,050 à 0,150
	Ni....................	2 à 3

Cet acier utilisé pour les pièces cémentées-trempées donne recuit :

R..........................	40 à 45
E..........................	26 à 30
A 0/0......................	34 à 30

Il est utilisé aussi en Amérique pour les tubes sans soudure.

2°	C....................	0,300 à 0,450
	Ni....................	1 à 2,5

Cet acier constitue le métal à canons actuel.

Il donne après recuit à 900° :

R.	50 à 60
E.	32 à 38
A 0/0	27 à 20

Après trempe au rouge cerise et recuit à 500° :

R.	70 à 90
E.	50 à 52
A 0/0	16 à 12

Cet acier est très répandu dans la construction, notamment pour les tôles, les rivets, les pièces embouties, les pièces de forge, les arbres coudés, les arbres de machines, les arbres de transmission fatigués, etc.

3°	C	0,200
	Ni	3,25 à 3,50

utilisé pour les tôles de chaudières, tôles de roues.

4°	C.	0,550
	N	3,50

utilisé pour les bandages de roues. — Avec un peu moins de carbone (0,400 environ), il est essayé pour les rails en Amérique.

5°	C	0,050 à 0,120
	Ni.	5 à 6

Cet acier est utilisé pour la cémentation suivie de trempe. Il offre une âme encore plus rigide que l'acier à 20/0 de nickel.

Il donne :

	R	47 à 55
	E	35 à 42
	A 0/0	30 à 27
6°	C	0,200 à 0,400
	Ni	5 à 6

Très utilisé dans les constructions mécaniques pour arbres, tiges de pistons, fusées, essieux.

Cet acier donne, recuit :

	R	60 à 70
	E	36 à 42
	A 0/0	25 à 20
7°	C	0,050 à 0,120
	Ni	7 à 8

Cet acier, qui, nous l'avons dit, relève d'une étude que nous avons faite sur la cémentation, permet d'obtenir, par simple cémentation, les mêmes résultats que par cémentation suivie de trempe.

Il donne :

	R	50 à 60
	E	40 à 45
	A 0/0	30 à 25
8°	C	0,350 à 0,400
	Ni	12

Cet acier, qui est martensitique, possède par lui-même de très hautes charge de rupture et limite élastique. Il présente le grave inconvénient d'être très difficile à travailler et surtout à forger. Cependant un recuit prolongé à 550° l'adoucit un peu.

Il donne à l'état recuit :

R	130 à 140
E	68 à 75
A 0/0	5 à 8

Il a été employé pour des arbres et est presque abandonné à l'heure actuelle. Il en est de même de certains aciers à 15 ou 17 0/0 de nickel.

9°	C	0,300
	Ni	25 à 30

Cet acier présente tous les avantages et aussi les inconvé-

nients des aciers à fer γ. C'est dire qu'il a une faible limite élastique et qu'il est difficile à travailler.

Ses caractéristiques sont à l'état recuit :

R	58 à 62
E	20 à 23
A 0/0	32 à 38

Il est adouci par la trempe. Il faut noter cependant que cet acier est assez près de la limite du deuxième groupe et peut, par conséquent, subir quelque transformation.

10°	C	0,250
	Ni	30 à 32

Il donne :

R	70 à 85
E	45 à 60
A 0/0	40 à 30

Employé surtout pour les soupapes d'automobiles.

Essayé actuellement pour la fabrication des tubes sans soudure. Cet acier résiste bien à l'oxydation.

11°	C	0,700 à 0,900
	Ni	25 0/0

C'est le *ferronickel* employé surtout dans la construction des rhéostats, sa résistance électrique étant dix fois celle du fer.

12°	C	0,200 environ
	Ni	36

C'est l'*invar* (invariable) de M. Guillaume.

Il donne :

R	70 à 85
E	45 à 55
A 0/0	35 à 25

13°	C	0,150 environ
	Ni	46

C'est le *platinite* de M. Guillaume.

Il donne :

R	60 à 70
E	30 à 30
A 0/0	45 à 35

Au sujet des nombreuses applications de ces deux derniers aciers, nous renverrons au livre que vient de publier M. Guillaume[1].

Nous dirons cependant que ces alliages offrent un intérêt tout spécial dans les applications suivantes :

1° Pour l'invar :

Chronométrie ;

Géodésie ;

Construction des appareils de précision ;

Établissement de transmissions indéréglables (notamment la commande des signaux avancés des grandes gares) ;

2° Pour le platinite :

Construction des lampes à incandescence où cet alliage remplace le platine ; d'où son nom.

Pour terminer, nous donnerons quelques renseignements industriels sur ces aciers et leurs traitements.

Ces tableaux sont tirés de diverses notices publiées par les principales aciéries.

1. *Application scientifique des Aciers au nickel*, chez Gauthier-Villars.

COMPAGNIE DES FORGES DE CHATILLON, COMMENTRY ET NEUVES-MAISONS

QUALITÉ	NUANCE	TRAITEMENT	LIMITE ÉLASTIQUE	CHARGE de RUPTURE	ALLONGEMENT pour 100	CONTRACTION	ESSAI AU CHOC sur barreaux entaillés kilogram. par cm²
Aciers à 6 0/0 de Ni	1 dur	A	70	80	20	65	30
		B	110	125	11	53	19
		C	125	140	10	50	17
	2 mi-dur	A	60	70	25	70	40
		B	70	82	18	58	30
		C	110	125	10	55	18
	3 doux pour cémentation	A	40	50	30	74	55
		B	40	50	30	75	55
		C	70	80	13	67	38

Les traitements A, B, C, indiqués dans le tableau ci-dessus, sont les suivants:
A, Chauffage au rouge sombre suivi d'un refroidissement à l'air.
B, Chauffage au rouge cerise suivi d'un refroidissement à l'air.
C, Trempe à l'eau après chauffage au rouge cerise clair, sans recuit final.

ACIÉRIES D'IMPHY

MARQUE	QUALITÉ	NUANCE	TRAITEMENT	LIMITE ÉLASTIQUE	CHARGE DE RUPTURE	ALLONGEMENTS p. 100
N_2CM	Ac. de cém. à 2 0/0 de Ni	Extra-doux	Recuit cerise clair	6-30	40-44	30-34
N_3CM	Ac. de cém. à 3 0/0 de Ni	Extra-doux	Recuit cerise clair	26-30	40-44	30-34
N_5CM	Ac. de cém. à 5 0/0 de Ni	Doux	Recuit cerise clair	32-36	44-48	28-32
N_2	Ac. à 2 0/0 de Ni	Demi-dur	Recuit cerise trempé et recuit	34-40 65-80	55-65 80-90	20-25 12-14
N_3	Ac. à 3 0/0 de Ni	Demi-dur	Recuit cerise trempé et recuit	34-40 66-86	55-65 85-105	20-25 11-14
N_5	Ac. à 5 0/0 de Ni	Demi-dur	Recuit cerise trempé et recuit	38-45 70-90	60-70 90-110	20-25 12-15

N_6	Ac. à 6 0/0 de Ni	Extra-dur	Recuit à 550-600° recuit cerise	75-80 95-110	85-95 110-135	12-16 6-10
N_3A	Ac. spéc. p. canons	Mi-dur	Recuit cerise trempé et recuit	34-40 66-86	55-65 85-105	20-25 11-14
Ni_{10}	Ac. à 10 0/0 de Ni	Extra-dur	Recuit à 550-600° recuit cerise	75-85 95-120	85-95 110-150	14-18 4-12
NC_4	Ac. à 20, 25 0/0 de Ni	Dur	Brut de forge recuit cerise clair	45-60 35-45	75-90 67-75	30-45 40-60
NAS	Ac. à plus de 30 0/0 de Ni	Mi-dur	Brut de forge recuit cerise clair	45-55 30-40	70-85 60-70	25-35 30-40

ACIÉRIES ET FORGES DE FIRMINY

NUANCES D'ACIER		TRAITEMENT	LIMITE ÉLASTIQUE	CHARGE DE RUPTURE	ALLONGEMENT POUR 100	CONTENANCE POUR 100
Acier au nickel 2,5 0/0 environ.	N° 1	Recuit à 870°	48,1	70,2	21,8	49,6
		Trempé à 870° et recuit à 550°	66,6	80,3	16,0	38,9
		Trempé à 870° et recuit bois pétil	120,5	126,8	6,6	37,8
Acier au nickel 16 0/0 environ.	N° 4	Recuit à 295°	Limite élastique très voisine de la charge de rupture.	104,8	8,2	43,1
		Recuit à 400°		101,5	9,3	49,6
		Recuit à 900°		123,2	9,8	43,4
Acier de cémentation au nickel.	N° 4	Recuit à 930°	35,3	46,1	28,9	64,7
		Trempé à 930° sans recuit	42,1	58,3	20,3	64,2
Acier au nickel 25 0/0 environ.	»	Recuit à 900°	30,4	78,9	60,0	»

F. KRUPP ET Cie

MARQUES	QUALITÉS	TRAITEMENT	LIMITE ÉLASTIQUE	CHARGE de RUPTURE	ALLONGEMENT POUR 100	CONTRACTION POUR 100
A_7	Acier pour automobile ordinaire, doux		31,1	54,9 **50**	25,8 **20**	58,2
C_{16}	Acier spécial		67,9 **50**	87,2 **70**	14 **12**	55,6
EF_{60}	Acier spécial au nickel pour voitures rapides	1 2 3	70,7 80,4 **65** 135	84,3 95,6 **75** 163	16 14,4 **12** 6	62
A_4	Acier cémentation pour automobile	Naturel. Trempé.	30,9 39,8	47 52,2	28,5 22,3	58 71,6
E_{120}	Acier cémentation au nickel	Naturel.	45,8 **38**	57,2 **55**	23,6 **20**	71,6

Les chiffres gras indiquent les minima garantis.

FORGES ET ACIÉRIES DE LA MARINE

QUALITÉS	NUANCES	TRAITEMENT	LIMITE ÉLASTIQUE	CHARGE de RUPTURE	ALLONGEMENT POUR 100
Ac. de cément. à 3 0/0 Ni	»	Recuit	37	55	26
		Trempé à l'huile	76	100	9
Acier à 5 0/0 Ni	doux	Recuit	40	56	20
		Trempé à l'huile	82	120	7
	dur	Recuit	56	82	15
		Trempé à l'huile	70	105	10
		Trempé à l'eau	80	135	9
Acier à 6 0/0 Ni	doux	Recuit	39	50	28
		Trempé à l'eau	94	115	10
Acier à 25 0/0 Ni	»	Recuit	45	85	45
		Trempé	38	78	65

SCHNEIDER ET Cie (LE CREUSOT)

QUALITÉS		TRAITEMENT	LIMITE ÉLASTIQUE	CHARGE de RUPTURE	ALLONGEMENT POUR 100
Acier à 1 0/0 de Ni		Recuit à 900°	26	40	30
		Trempé eau à 900°	34	55	18
Acier à 3 0/0 de Ni	Nuance mi-douce	Recuit à 900°	35	50	25
		Trempé huile à 900°, recuit à 550°-600°	48	56	20
Pièces de forge	Nuance mi-dure	Recuit à 900°	42	60	20
		Trempé huile à 900°, recuit à 550°-600°	58	68	15
Acier à 5 0/0 de Ni	Nuance mi-dure 60 kilog.	Recuit à 900°	44	62	20
		Trempé huile à 850°, recuit à 550°-660°	62	72	15
	Nuance dure 70 kilog.	Recuit à 900°	52	72	15
		Trempé huile à 850°, recuit à 550°-600°	75	85	12
Acier à 12 0/0 de Ni		Recuit à 900°	72	140	6
		Recuit à 900°, puis à 550°	80	95	12
Acier à 25 0/0 de Ni		Recuit à 900°	22	60	35
		Trempé eau à 900°	20	58	40
		Recuit à 900°	35	80	45
		Trempé eau à 900°	32	77	55
Acier à 30 0/0 de Ni		Recuit à 900°	22	58	38
		Trempé eau à 900°	20	56	44

ACIERS AU MANGANÈSE

Étude théorique. — COURBES DE REFROIDISSEMENT. — M. Osmond a montré que le manganèse abaisse les points critiques du fer.

Voici les résultats qu'il a présentés à l'Académie des Sciences en 1897 :

COMPOSITION			RALENTISSEMENT PRINCIPAL	RECALESCENCE
C	Mn	Si		
0,29	0,27	0,06	800 — 715	685
0,32	0,50	0,05	760 — 690	664
0,42	1,00	0,03	725 — 690	648
0,46	1,08	0,07	720 — 643	643

Le point de transformation magnétique s'abaisse plus vite que le point de recalescence, et ces deux points coïncident déjà, quand la teneur en manganèse s'élève à 0,250 0/0, en un point critique unique dont la température est voisine de 400°.

Si le manganèse croît au-delà de 2,5 0/0, le point critique, en apparence unique et qui se manifeste au refroidissement, tombe au-dessous de 400°.

Un acier : C = 0,450; Si = 0,11; Mn = 4 a son point de transformation entre 300 et 200°.

Un autre acier : C = 0,320; Si = 0,26; Mn = 5, présente un point critique qui est au-dessous de 100°.

A partir de 7 0/0 de manganèse, le point critique au refroidissement devient très voisin de la température ordinaire. Même à 12 0/0 de manganèse, les aciers ne présentent plus aucun point de transformation magnétique jusqu'à la température ordinaire.

M. Dumas a fait quelques déterminations qui aboutissent au même résultat. Il faut ajouter — ce que nous expliquerons plus loin — que M. Hadfield, en recuisant un acier à 12 0/0

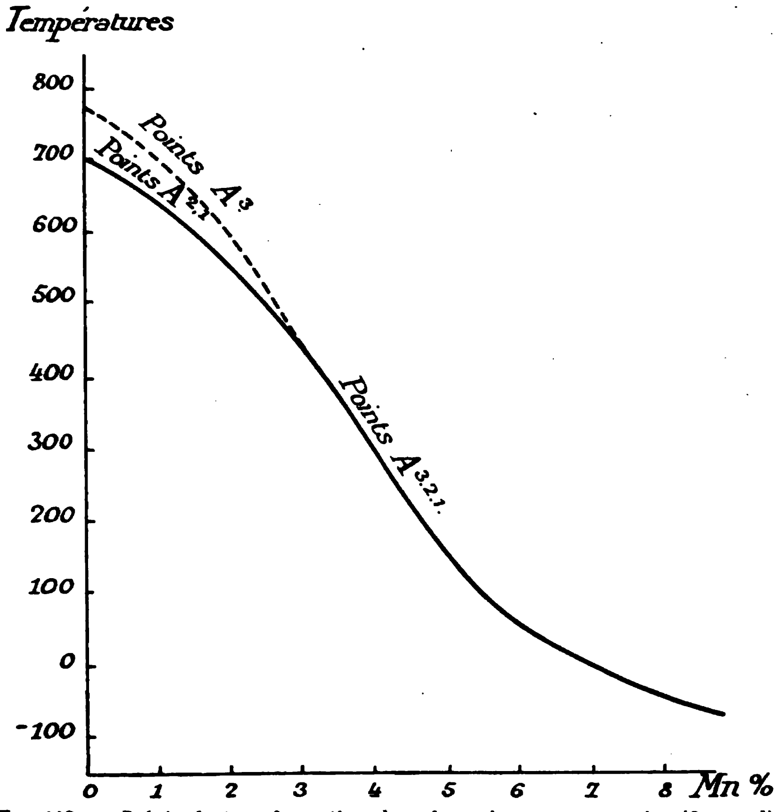


Fig. 102. — Points de transformation dans les aciers au manganèse (Osmond).

de manganèse non magnétique, pendant dix jours, l'a obtenu à l'état magnétique.

Métallographie (Album, Pl. XIV, phot. 53 à 56). — Dans les recherches sur la cristallographie du fer, M. Osmond a montré que certains aciers au manganèse non magnétiques ont la structure caractéristique du fer γ.

Voici les résultats des recherches que nous avons faites sur ces aciers et qui ont porté sur deux séries : la première à 0,200 0/0 de carbone, la seconde à 0,800 0/0.

Aciers à 0,200 0/0 *de carbone*. — Les aciers contenant de 0 à 4,2 de manganèse ont même constitution que les aciers au carbone.

Les aciers contenant de 5,65 de manganèse à 12,7 sont formés de martensite (Pl. XIV, phot. 53). Il y a évidemment pour ces aciers des zones de transition. C'est ainsi que l'acier contenant 0,173 de carbone et 10,5 de manganèse est formé de fer γ et de martensite.

L'acier qui contient 0,137 de carbone et 12,17 de manganèse est le premier acier polyédrique de la série.

Au-delà de 12,77 0/0 de manganèse, les aciers sont polyédriques, du moins jusqu'aux teneurs que nous avons étudiées, c'est-à-dire 35,5 0/0 environ. Ces polyèdres présentent, comme ceux des aciers au nickel, de nombreux plans de clivage ; mais, tandis que, dans ceux-ci, ces plans apparaissent toujours par attaque, il nous a été impossible de trouver un moyen certain de les faire naître dans les aciers au manganèse (Pl. XIV, phot. 54).

De plus, ces polyèdres sont beaucoup moins développés que dans les aciers au nickel ; à l'acide picrique, l'acide azotique, etc., les bords apparaissent moins nettement que pour ces aciers, et cela à un point tel que, lorsqu'on regarde ces aciers à un grossissement de 200 diamètres environ, on les prendrait, de par les plans de clivage, pour des aciers martensitiques, alors que, vus à un grossissement de 400 diamètres environ, ils montrent nettement les lignes de démarcation des polyèdres.

Tout au début de cette étude, nous avons commis cette erreur sur l'acier de la première série contenant 20,8 0/0 de manganèse.

En résumé, les aciers au manganèse de la première série doivent être divisés en trois classes au point de vue micrographique :

Première classe : Aciers, ayant même constitution que les aciers au carbone, contenant de 0 à 5 0/0 environ de manganèse ;

Deuxième classe : Aciers à structure martensitique, contenant de 5 à 12 0/0 de manganèse ;

Troisième classe : Aciers à structure polyédrique, contenant plus de 12 0/0 de manganèse.

Les aciers de la deuxième classe doivent subir une subdivision, suivant qu'ils sont formés de fer α et de martensite, de martensite pure, ou de fer γ et de martensite.

Nous n'avons pas remarqué que la perlite des aciers au manganèse à faible teneur en carbone présentât un caractère spécial.

Aciers à 0,800 0/0 *de carbone.* — Les aciers contenant de 0 à 3 0/0 de manganèse ont même constitution que les aciers au carbone; ils présentent de la perlite et de la ferrite ou de la perlite et de la cémentite. Mais la perlite présente des caractères spéciaux que l'on ne rencontre pas dans les aciers au carbone. Elle est plus compacte et elle se colore beaucoup plus facilement que la perlite ordinaire. Elle se rapproche de la sorbite.

Lorsqu'on examine l'acier contenant 5,1 de manganèse, on rencontre une autre microstructure que nous n'avions jamais obtenue dans les aciers spéciaux normaux. Ce sont des rognons très développés qui envahissent toute la préparation et que l'on fait apparaître en noir foncé sous les attaques les plus rapides à l'acide picrique (Pl. XIV, phot. 55).

A la suite de cette observation, nous avons examiné des aciers contenant entre 3 et 5 0/0 de manganèse et environ 0,800 de carbone; dans tous nous avons rencontré le constituant spécial que nous venons de décrire.

On peut donc conclure de suite que, dans les aciers au manganèse très carburés, il n'existe pas de martensite, mais que celle-ci est remplacée par un produit très facile à colorer par les acides azotique et picrique.

Ce constituant, de par ses formes, sa coloration si rapide et même les propriétés de trempe douce qu'il communique aux aciers, rappelle en tous points la troostite de M. Osmond.

Un fait analogue rencontré dans les aciers au chrome nous a

prouvé que nous devions nous arrêter à cette hypothèse. A partir de 7 0/0, tous les aciers sont polyédriques (Pl. XIV, phot. 56).

En résumé, la classification qui doit être admise pour ces aciers à 0,800 0/0 de carbone est la suivante :

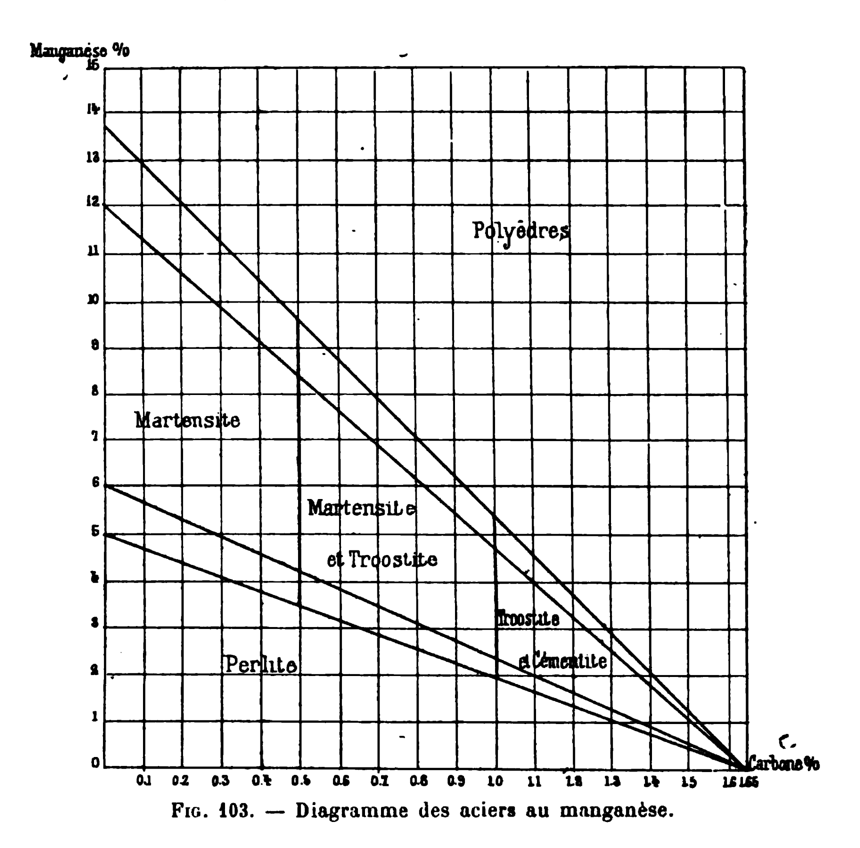


Fig. 103. — Diagramme des aciers au manganèse.

Première classe : Aciers formés de perlite, renfermant de 0 à 3 0/0 de manganèse ;

Deuxième classe : Aciers renfermant de la troostite, contenant de 3 à 7 0/0 de manganèse ;

Troisième classe : Aciers formés de fer γ renfermant plus de 7 0/0 de manganèse.

Le tableau suivant résume les caractéristiques micrographiques des aciers au manganèse :

CLASSES	CARACTÉRISTIQUES MICROGRAPHIQUES	ACIERS à 0,200 C	ACIERS à 0,800 C
1re classe	Perlite	De 0 à 5 0/0 Mn	De 0 à 3 0/0 Mn
2e —	Martensite ou troostite	De 5 à 12 0/0 Mn	De 3 à 7 0/0 Mn
3e —	Fer γ	Mn > 12 0/0	Mn > 7 0/0

Comme pour les aciers au nickel, nous avons résumé ces résultats dans un diagramme très simple qui est donné par la figure 103. On distingue les trois classes d'acier que nous venons de définir, ainsi que la séparation de la martensite et de la troostite.

Résistance électrique. — M. H. Le Chatelier a montré que le manganèse augmente considérablement la résistance des aciers. L'accroissement est d'environ 5 microhms par 1 0/0 en poids de manganèse.

Magnétisme. — Bien que le magnétisme des aciers au manganèse ait été moins étudié que celui des aciers au nickel, on sait cependant, après les travaux de M. H. Le Chatelier (*Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXIX, p. 272; 1894) que l'on peut transformer le métal non magnétique en métal magnétique. Pour cela il suffit de le recuire entre 550 et 650°.

A la température de 550° la durée de la transformation complète serait comprise entre une heure et deux heures.

Inversement, pour transformer le métal magnétique en métal non magnétique, il faudrait le porter à une température égale ou supérieure à 800° et refroidir assez rapidement pour éviter la transformation inverse; le refroidissement à l'air suffit.

Étude chimique. — MM. Carnot et Goutal ont démontré tout d'abord l'affinité connue du manganèse pour le soufre et le silicium.

De plus, ils ont pu isoler des carbures doubles dont la composition et les propriétés sont très variables avec la teneur

en manganèse ; ce sont, pour les alliages renfermant

De 74 à 85 0/0 de manganèse	....	$Fe^3C, 4Mn^3C$
— 60 à 74 0/0 —	....	$Fe^3C, 2Mn^3C$
— 30 à 60 0/0 —	....	$2Fe^3C, Mn^3C$
Moins de 18 0/0 —	....	$4Fe^3C, Mn^3C$

D'après MM. Carnot et Goutal, ce serait ce dernier carbure qui existerait dans les spiegels et les fontes.

Ce composé est insoluble dans l'acide acétique et soluble dans l'acide sulfurique étendu.

Étude industrielle. — FABRICATION. — Les aciers au manganèse sont bien moins répandus que les aciers au nickel. On peut même dire que l'acier obtenu, en 1888, par M. Hadfield, lequel contient environ 12 0/0 de manganèse et 1,4 0/0 de carbone, est seul préparé industriellement[1].

La fabrication se fait au four à creusets pour les hautes teneurs. D'ailleurs elle offre de grandes difficultés : elle doit se faire dans des fours ou dans des creusets recouverts de magnésie. La matière première peut être soit un ferro-manganèse, soit le manganèse métallique.

PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES. — On sait que les propriétés mécaniques des aciers au manganèse ont été étudiées pour la première fois par M. Hadfield, le savant directeur d'*Hecla-Works*, à Sheffield. Dans ce remarquable mémoire, M. Hadfield définit les propriétés du fameux acier à 12 0/0 de manganèse, qui fut, en somme, le premier acier spécial intéressant. On sentit, à cette époque, que les recherches de M. Hadfield ouvraient une ère nouvelle à la sidérurgie.

Nous regrettons vivement que l'espace que nous pouvons consacrer aux aciers spéciaux ne nous permette pas de reproduire les mémoires de M. Hadfield. Pour bien montrer l'importance qu'il faut attacher à l'œuvre de ce savant indus-

1. Les aciers mangano-siliceux, déjà fort usités en construction mécanique, doivent être regardés comme des aciers quaternaires. Il en est de même, bien entendu, des aciers chrome-nickel.

triel, nous ne pouvons mieux faire que de reproduire ici le jugement de M. Osmond : « La série de ses alliages a été préparée avec un degré d'habilité technique qui détruit un grand nombre d'idées conçues à tort et résultant d'une préparation inparfaite ou d'une manipulation défectueuse. Sa méthode a été vraiment scientifique..... Au surplus, M. Hadfield n'a pas fait seulement le meilleur usage personnel des résultats, mais avec une générosité qui ne s'est jamais démentie, il les a mis à la disposition des chercheurs..... Par suite, les résultats acquis ont progressé rapidement, et de leur accumulation ont été dégagées des lois générales..... La découverte de l'acier au manganèse (non magnétique) n'apparaît pas seulement comme la découverte d'un alliage nouveau, curieux et précieux néanmoins, mais elle prend rang comme découverte dont l'importance n'est égalée que par celle de l'action de la trempe, la seule qu'il ait été donné de faire à notre génération dans l'histoire de la métallurgie du fer. » (*Iron and Steel Institute*, 1903, II, p. 106.)

Nous donnerons ici le résumé des essais que nous avons effectués sur les aciers au manganèse.

Les courbes ci-jointes (*fig.* 104 à 107), reproduisent les résultats des essais mécaniques que nous avons pratiqués sur les aciers au manganèse dans les mêmes conditions que pour les aciers au nickel.

Ces courbes montrent nettement que la subdivision donnée par ces essais est identique à celle fournie par la micrographie.

Pour les aciers à environ 0,200 0/0 de carbone (*fig.* 104), ceux de la première classe (de 1 à 5 0/0 de manganèse) présentent une charge de rupture et une limite élastique qui croissent lentement avec la dose de manganèse, tandis que la striction et les allongements diminuent peu ; ces aciers présentent une très grande résistance au choc ; ce point est extrêmement important, et, pour le bien démontrer, nous avons cassé plus de cent éprouvettes Frémont (*fig.* 106) ; les résultats obtenus sont, en effet, en contradiction absolue avec l'opinion très répandue parmi les métallurgistes, à savoir que

le manganèse donne de la fragilité aux aciers. Nous croyons nettement avoir démontré, au contraire, que le manganèse ne

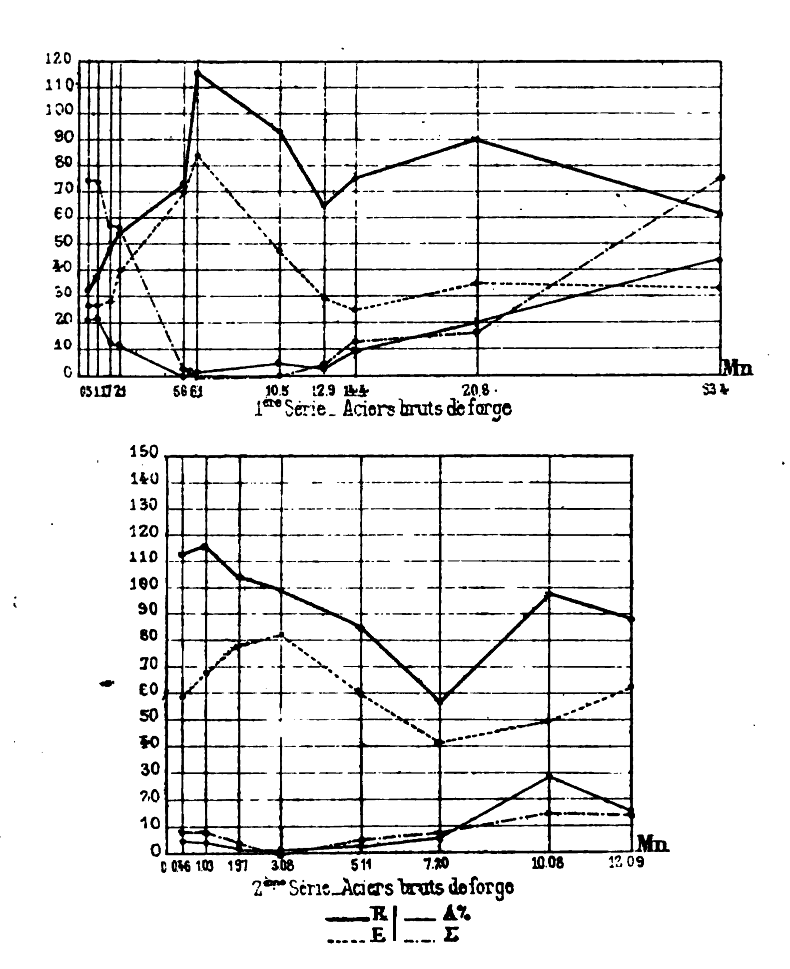


Fig. 104 et 105. — Essais à la traction sur les aciers au manganèse normaux.

donne de la fragilité que lorsqu'il est en quantité suffisante, ou, mieux, lorsque la somme carbone + manganèse est assez élevée pour amener la production de martensite; tant que la structure est perlitique, l'acier, loin d'être fragile, est extrêmement homogène et présente une résistance au choc que l'on

ne rencontre qu'exceptionnellement dans les aciers au carbone. Ces aciers possèdent une faible dureté (*fig.* 107).

Ceux de la seconde classe (de 5 à 12 0/0 de manganèse) possèdent des charges de rupture et des limites élastiques, très élevées, des allongements et des strictions très faibles ; ils sont extrêmement fragiles et durs.

Les aciers de la troisième classe, qui ont été définis dès 1888 par M. Hadfield, sont caractérisés par des propriétés qui les rapprochent beaucoup des aciers à haute teneur en nickel. Ils

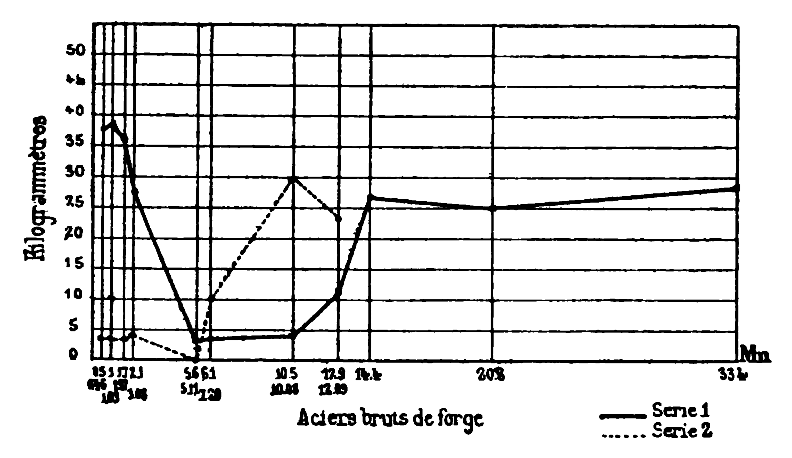


Fig. 106. — Essais au choc sur les aciers au manganèse.

ont de grands allongements et de faibles limites élastiques. Il est à noter que les allongements se produisent dans toute la longueur de l'éprouvette, mais ils sont très difficiles à travailler.

Examinons maintenant les propriétés mécaniques des aciers de la deuxième série, qui renferment environ 0,800 0/0 de carbone.

On voit, tout d'abord (*fig.* 105), que la charge de rupture et la limite élastique vont en croissant à mesure que le pourcentage de manganèse augmente ; puis la limite élastique décroît, tandis que les allongements et la striction acquièrent des valeurs plus élevées.

On ne voit pas nettement ici la séparation entre la première et la seconde classe ; mais le passage aux aciers à fer γ est nettement indiqué.

Les aciers de la première et de la deuxième classe sont fragiles ; les aciers de la troisième classe sont, au contraire, résistants au choc (*fig.* 106).

La dureté donne des renseignements précieux : tandis que les aciers renfermant jusqu'à 7 0/0 de manganèse sont d'une

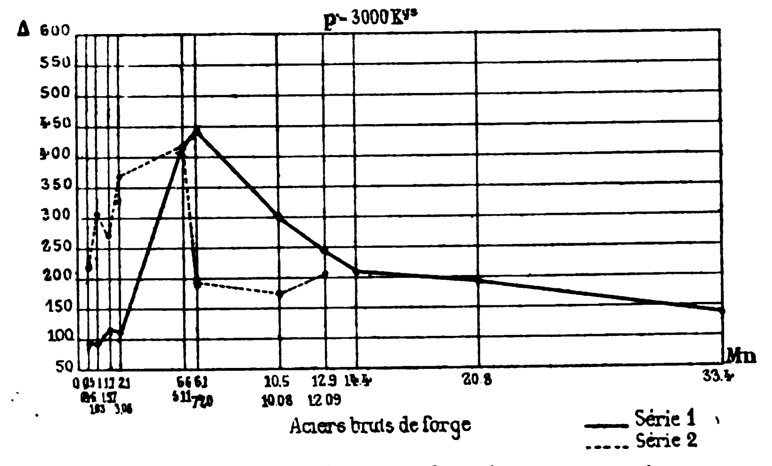


FIG. 107. — Essais à la dureté sur les aciers au manganèse.

dureté élevée, ceux renfermant plus de 7 0/0 de ce métal donnent un chiffre de Brinell assez faible (*fig.* 107).

INFLUENCE DES TRAITEMENTS. — L'influence des traitements est sensiblement la même que pour les aciers au nickel.

Aussi donnerons-nous de rapides conclusions.

Trempe. — La trempe a sur les aciers perlitiques même action que sur les aciers au carbone.

Les aciers martensitiques ne sont pas transformés par la trempe ; il faut toutefois noter que, parmi eux, les aciers les plus riches en manganèse ont une tendance à la structure polyédrique. Ils sont donc légèrement adoucis ; la charge de rupture est un peu abaissée.

Quant aux aciers à troostite, ils deviennent martensitiques et sont par là même durcis par une trempe à température d'au moins 800°.

Les aciers du troisième groupe ne sont pas généralement atteints par trempe; ils subissent seulement un léger adoucissement. Toutefois les tout premiers aciers de cette série deviennent légèrement martensitiques par trempe comme les aciers au nickel.

Recuit. — Le recuit n'a aucune influence sur les aciers perlitiques; il en a fort peu sur les aciers du deuxième groupe : il crée simplement une tendance à la structure polyédrique.

Pour les aciers du dernier groupe, il faut distinguer : si l'acier est sur la limite du second et du troisième groupe, il pourra être atteint par le recuit et donner de la martensite. Si l'on considère des aciers plus riches en manganèse, le recuit a seulement pour effet d'accentuer les polyèdres et les plans de clivage.

Écrouissage. — Certains aciers au manganèse se trouvant à la séparation du deuxième et du troisième groupe subissent des transformations par écrouissage ; il se produit de la martensite d'autant plus abondante que l'écrouissage est plus prononcé.

Refroidissement. — Le refroidissement agit sur les mêmes aciers en produisant le même effet.

Cémentation. — La cémentation des aciers renfermant moins de 2 0/0 de manganèse donne sensiblement les mêmes résultats que la cémentation de l'acier au carbone. Mais les bords *s'effritent* plus aisément sous l'influence des chocs.

Si l'on cémente un acier renfermant 5 à 6 0/0 de manganèse, le centre est toujours martensitique avec parfois une tendance à la structure polyédrique; plus on approche du bord, plus la martensite devient accentuée ; bientôt on trouve une zone de troostite.

Les aciers au manganèse ne sont donc pas intéressants pour la cémentation non suivie de trempe.

Des aciers martensitiques riches en manganèse restent bien martensitiques au centre, mais ils deviennent polyédriques sur les bords et montrent, avant cette couche, de la troostite.

Quant aux aciers polyédriques, ils subissent les transformations que nous avons déjà indiquées pour les aciers similaires au nickel.

Utilisations. — Comme nous le disions au commencement de ce chapitre, la seule application actuelle des aciers au manganèse se trouve dans les moulages obtenus avec l'acier de M. Hadfield.

Est-ce là la seule application possible des aciers au manganèse ?

Nous ne le pensons pas. Ils peuvent, jusqu'à un certain point, se substituer aux aciers au nickel, et cela d'autant plus facilement qu'à qualités mécaniques égales ils coûtent beaucoup moins cher.

Il faut, en effet, beaucoup moins de manganèse que de nickel, pour produire le même effet, environ 2,2 fois moins. De plus, nous l'avons dit et nous avons même insisté sur ce point, le manganèse métallique (préparé par aluminothermie et, par conséquent, ne contenant pas de carbone) ne coûte que 3 francs le kilogramme, tandis que le nickel coûte environ 4 francs. Il est vrai que les pertes en manganèse pendant la fabrication sont importantes.

Enfin, il ne semble pas, *a priori*, qu'il existe quelques difficultés à faire de la fabrication en grandes masses d'aciers au manganèse, à condition de prendre des précautions. Les aciers perlitiques peuvent être employés aux lieu et place des aciers de cette même catégorie au nickel ; s'ils ne sont pas plus employés, cela est dû, nous le répétons, à l'idée fausse de la fragilité amenée par le manganèse et aussi à ce que, jusqu'à ces derniers temps, il ne fallait pas songer à préparer des aciers au manganèse à basse teneur en carbone, tandis que, maintenant, grâce au four électrique et à l'aluminothermie, ce problème est entièrement et économiquement résolu.

Cependant il est un point que nous tenons à signaler, c'est

que les aciers au manganèse deviennent plus rapidement fragiles par recuit que les aciers au nickel et même que les aciers au carbone. De ce fait, il ne faudrait pas songer à employer les aciers au manganèse comme aciers de cémentation.

De plus, les aciers au manganèse de la seconde classe présentent, lorsqu'ils sont assez riches en carbone, de la troostite. Ce composé, possédant une dureté minéralogique bien inférieure à celle de la martensite, les aciers au manganèse perlitiques ne sauraient être utilisés pour obtenir des pièces à périphérie très dure par simple cémentation non suivie de trempe. Quant aux aciers de la deuxième classe (martensite et troostite), ils ne peuvent être utilisés dans la construction. Ils sont extrêmement fragiles.

Enfin nous ne voyons pas pourquoi les aciers au manganèse à fer γ ne se substitueraient pas aux aciers de la même classe au nickel. Ils sont peut-être un peu plus difficiles à travailler ; mais la différence de prix compense bien ce léger inconvénient.

En résumé, on peut déclarer que les aciers au manganèse n'ont pas été encore assez étudiés au point de vue industriel.

L'acier de M. Hadfield est utilisé plus spécialement pour des pièces qui doivent subir des chocs importants, telles que les pointes d'aiguilles de chemins de fer, les broyeurs, etc., et pour les coffres-forts.

Il renferme :

C....................	1 à 1,5
Mn....................	12 à 15 0/0

Il donne, trempé à l'eau à 900° :

R..............................	95
E..............................	35
A 0/0..........................	45

(résultats donnés par les usines du Creusot qui sont concessionnaires du brevet pour la France).

ACIERS AU CHROME

Étude théorique. — COURBES DE REFROIDISSEMENT. — Les résultats connus sur les points de transformation des aciers au chrome sont relativement peu précis, puisqu'ils ont été déterminés sur des aciers très carburés.

D'après les recherches de M. Osmond, le point de transformation magnétique semble rester à peu près invariable.

Quant au point A_1, il paraît au contraire se relever. Mme Curie, dans son étude des aciers trempés, a montré qu'un acier à 3,4 0/0 de chrome et 1,07 0/0 de carbone a ce point de transformation à 746° à l'échauffement et à 727° au refroidissement (au lieu de 725 et 695 pour un acier au carbone ordinaire).

Mais le point le plus intéressant est le suivant :

M. Osmond a montré que la température à laquelle a été porté un acier au chrome a une influence considérable sur le point de transformation au refroidissement qui suit ce chauffage (Discussion qui a suivi le *Rapport sur les aciers au chrome*, de M. Hadfield, *Iron and Steel Institute*, 1892, II) ; plus la température de chauffage est élevée, plus le point de transformation au refroidissement qui suit est bas ; le chrome paraît s'opposer à la dissolution comme à la ségrégation de la cémentite. Le tableau suivant donne, d'ailleurs, les résultats pour un des aciers observés par M. Osmond :

Température de chauffage maximum	Transformation au refroidissement
835	713 — 716
1030	682 — 692
1220	635 — 643
1320	640 — 600

MÉTALLOGRAPHIE (Pl. XV à XVII). — Les aciers au chrome ont été étudiés par M. Osmond au point de vue micrographique. Nous donnerons les principaux résultats obtenus par ce savant, tout en résumant nos recherches.

Dans l'étude des aciers renfermant environ 0,200 0/0 de

carbone, on trouve tout d'abord des aciers perlitiques qui contiennent de 0 à 7 0/0 de chrome; dans ces aciers, il y a un fait particulièrement intéressant à noter et qui a été mis tout spécialement en vue par M. Osmond, c'est que les grains de ferrite deviennent de plus en plus petits au fur et à mesure que le pourcentage de chrome augmente (Phot. 57 et 58, Pl. XV).

A partir de 7 0/0 de chrome, les aciers sont martensitiques; cette martensite apparaît sous l'action de l'acide picrique; il en est ainsi jusqu'à 14,5 0/0 de chrome (Phot. 59, Pl. XV).

A ce pourcentage, l'acide picrique ne fait apparaître que des polyèdres assez mal définis entourés de points blancs extrêmement brillants. Si on fait une attaque à l'acide chlorhydrique ou au bisulfate de potassium, on voit apparaître, dans l'intérieur des polyèdres, de la martensite extrêmement fine. Ce point a son importance; il prouve, en effet, que la martensite qui contient une quantité assez élevée de chrome en solution est de nature spéciale. Au-delà de ce pourcentage, on rencontre des polyèdres qui sont toujours entourés de grains blancs brillants, mais dans lesquels il est impossible de faire apparaître de la martensite. Petit à petit ces grains blancs envahissent la préparation et on obtient une image qui est comparable à celle d'un beau ciel étoilé, comme l'a dit M. Osmond (Phot. 61, Pl. XVI).

Si l'on examine les aciers renfermant environ 0,800 0/0 de carbone, on trouve tout d'abord des aciers perlitiques jusqu'à 3 0/0 de chrome.

De 3 à 9 0/0 de chrome, les aciers présentent une troostite très compacte semblable à celle que l'on rencontre dans les aciers au manganèse (Phot. 60, Pl. XV). L'acier à 9 0/0 de chrome attaqué à l'acide picrique nous a donné des polyèdres bordés de petits rognons noirs; ce même acier attaqué à l'acide chlorhydrique ou au bisulfate de potassium nous a donné de la martensite dans l'intérieur des polyèdres.

A 14,5 0/0, on obtient toujours de la martensite dans les polyèdres; mais elle est très clairsemée. On aperçoit des grains blancs très brillants.

A 18,6 0/0, on ne voit plus du tout de martensite, les grains blancs sont plus nombreux, et cela continue tant que le pourcentage de chrome augmente (Phot. 61 et 62, Pl. XVI).

Qu'est-ce donc que cés grains blancs que l'on trouve dans une classe déterminée d'aciers au chrome?

Par cémentation on peut faire naître ce constituant spécial dans un acier perlitique ou martensitique.

C'est donc un carbure.

Au point de vue micrographique, ce constituant présente différents caractères qui le rapprochent de la cémentite ; c'est ainsi qu'il est coloré en noir par le picrate de soude en solution sodique.

En résumé, la micrographie nous conduit, pour les aciers au chrome, aux subdivisions suivantes :

CLASSES	MICROSTRUCTURES	ACIERS à 0,200 C	ACIERS à 0,800 C
1re	Perlite...........	De 0 à 7 0/0 Cr	De 0 à 3 0/0 Cr
2e	Martensite ou troostite..........	De 7 à 15 0/0 Cr	De 3 à 10 0/0 Cr
3e	Constituant spécial et martensite....	De 15 à 20 0/0 Cr	De 10 à 18 0/0 Cr
4e	Constituant spécial	Teneur en Cr > 20 0/0	Teneur en Cr > 18 0/0

Nous avons insisté sur la troisième classe formée par le constituant spécial et la martensite, laquelle pourrait être regardée comme un terme de passage; mais nous verrons qu'elle a une certaine importance pour le diagramme que nous indiquons plus loin, et pour la classification d'après les propriétés mécaniques.

Nous ne pouvons qu'esquisser le diagramme des aciers au chrome ; bien que nos observations soient déjà très nombreuses, un point reste en suspens.

Cependant, ce diagramme doit se rapprocher beaucoup de la figure 108. On y distingue, en dehors des zones de passage quatre espaces bien distincts :

1° La zone perlitique ;

2° La zone martensitique;

3° La zone à martensite et à carbure double;

4° La zone à carbure double.

La troisième zone peut être considérée comme zone de passage; c'est la seule qui, dans la figure donnée, est définie d'une façon un peu approximative; la droite CD n'est pas suffisamment précisée par nos recherches.

A chaque zone correspondent des aciers ayant des propriétés mécaniques bien définies.

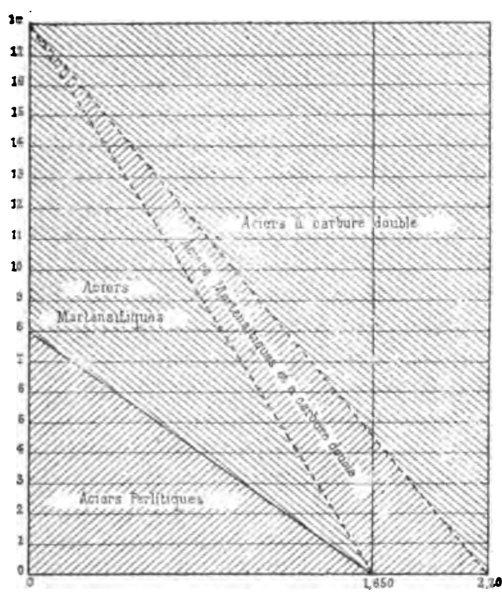


Fig. 108. — Diagramme des aciers au chrome.

Cette étude nous montre qu'on ne peut pas envisager l'utilisation des aciers au chrome pour obtenir des pièces d'une grande dureté superficielle par simple cémentation. En effet les aciers de la deuxième classe contiennent de la troostite lorsqu'ils sont à haute teneur en carbone.

En résumé, le chrome agit d'abord comme le nickel et le manganèse, puis forme un carbure double.

Étude industrielle. — Fabrication. — Les aciers au chrome se préparent soit au four Martin, soit au creuset.

La matière première est ordinairement du ferro-chrome.

Le chrome métallique est peu utilisé, car la dose de chrome est généralement faible et par là même la teneur en carbone de la matière première intervient peu.

PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES. — Les diagrammes que nous donnons (*fig.* 109 à 112) reproduisent les propriétés mécaniques des aciers au chrome. On voit que nous retrouvons bien les divisions indiquées par la micrographie.

En résumé, les aciers perlitiques (première classe) ont des propriétés analogues aux aciers au carbone; cependant leur charge de rupture est d'autant plus élevée que le pourcentage en chrome est plus élevé; ils sont un peu plus fragiles que les aciers ordinaires à même teneur en carbone; leur dureté croît avec le chrome.

Les aciers martensitiques (deuxième classe) possèdent de très hautes charges de rupture, de très hautes limites élastiques, de faibles allongements et de faibles strictions.

Ces aciers ne sont pas très fragiles, lorsque leur teneur en carbone n'est pas très élevée; ils possèdent une dureté très forte qui ne dépend sensiblement que de la teneur en chrome et non de la teneur en carbone.

Les aciers qui renferment en même temps de la martensite et le carbure double (troisième classe) possèdent des charges de rupture et des limites élastiques très élevées; ils sont très fragiles.

Enfin les aciers à carbure double (quatrième classe) ont une charge de rupture et des limites élastiques plutôt basses; ils possèdent de belles strictions et des allongements moyens; ils ont une faible dureté. Sous ce rapport, ils se rapprochent des aciers au nickel ou au manganèse à fer γ; mais ils sont très fragiles.

Il est bien à penser que cette très faible résistance au choc provient de la présence du carbure double.

Nous attirons particulièrement l'attention sur ce fait important, à savoir : que ces aciers ont des allongements assez élevés et de belles strictions, quoique leur fragilité soit très grande. *Ceci prouve, encore une fois, la nécessité des essais au choc.*

INFLUENCE DES TRAITEMENTS. — *Trempe.* — Dans la trempe, les aciers au chrome perlitiques subissent les mêmes transformations que les aciers au carbone, mais avec plus d'acuité.

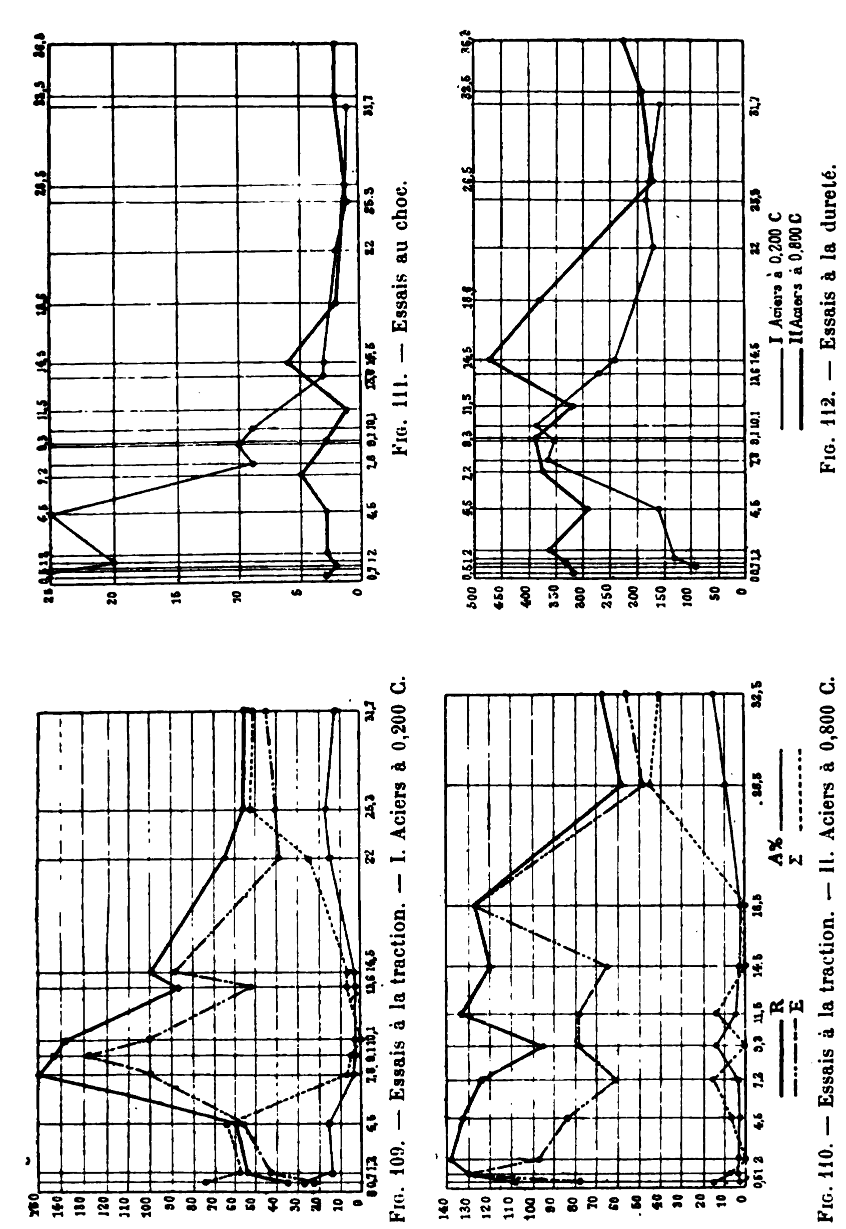


FIG. 109. — Essais à la traction. — I. Aciers à 0,200 C.

FIG. 110. — Essais à la traction. — II. Aciers à 0,800 C.

FIG. 111. — Essais au choc.

FIG. 112. — Essais à la dureté.

FIG. 109 à 112. — *Essais sur aciers au chrome normaux.*

Les aciers au chrome martensitiques sont légèrement adoucis par la trempe, et cet adoucissement est d'autant plus net qu'ils renferment moins de carbone; il y a une tendance à la formation de fer γ. Les aciers à troostite donnent de la martensite.

Les aciers au chrome renfermant le carbure double sont légèrement adoucis par une trempe à 850°, sans avoir subi dans leur constitution aucun changement visible au microscope; mais une trempe de 1.200° dissocie ou dissout le carbure double en partie ou en totalité, suivant la vitesse de refroidissement et la quantité initiale de ce produit; il semble, de plus, se produire du fer γ (Phot. 63 et 64, Pl. XVI).

Recuit. — Les aciers perlitiques ne subissent aucune transformation particulière.

Les aciers martensitiques ont leur structure accentuée par le recuit; dans certains de ces aciers, on voit apparaître de la troostite.

Les aciers à carbure double sont peu modifiés; les grains blancs de carbure double augmentent cependant. Lorsque le recuit est assez prolongé, dans les aciers à carbure, on remarque que les grains de ce constituant viennent se ranger et former les bords de polyèdres remplis d'un eutectique (Phot. 66, Pl. XVII).

D'autre part, dans un acier à 40,2 0/0 de chrome très carburé, un recuit à 1.200° pendant quatre heures donne la texture très nette d'un eutectique.

Dans tous les cas, les aciers au chrome sont légèrement adoucis par un recuit à 900° de faible durée.

Cémentation. — Il n'y a rien de particulier à noter sur les aciers au chrome cémentés; leur structure se déduit de celle des aciers normaux (Phot. 67 et 68, Pl. XVII).

UTILISATIONS. — Les aciers au chrome ne sont guère employés dans la construction. Leur principal débouché s'est trouvé dans la confection des obus de rupture qui renferment 0,800 de carbone et 2 0/0 de chrome et dans la fabrication des plaques paraballes.

Seuls les aciers perlitiques pourraient trouver quelques autres

applications ; mais, toutes choses égales d'ailleurs, leur prix est plus élevé, et ils sont plus difficiles à travailler. Ils sont justement utilisés comme aciers à outils.

Les aciers martensitiques sont trop fragiles et trop durs pour être employés.

Les aciers à carbure double n'offrent aucun intérêt; leur prix est extrêmement élevé; ils sont fragiles et ne possèdent aucune dureté.

En résumé, le chrome seul n'apporte pas aux aciers des propriétés qui soient particulièrement intéressantes, si ce n'est une grande dureté, qui en indique l'usage pour certains outils et quelques fabrications spéciales.

Mais il faut bien noter qu'à ce point de vue le chrome ne peut être remplacé par aucun autre métal, si ce n'est, jusqu'à un certain point, par le vanadium, comme nous le verrons plus loin.

Les types les plus employés d'aciers au chrome pour outils, surtout pour limes, correspondent aux compositions suivantes :

Acier dur............	C = 0,500 à 0,750 —	Cr = 2
Acier très dur.........	C = 1 à 1,250	Cr = 2,5
Acier extra-dur........	C = 1,500 à 1,700	Cr = 2,75 à 3

Quelques usines ont essayé les aciers au chrome dans la fabrication des ressorts, et certains de ces alliages ont été utilisés comme plaques de blindages, notamment des aciers renfermant

C......................	0,300 à 0,450
Cr.....................	0,700 à 2

Ils ont été complètement abandonnés dans cette dernière application pour les aciers au chrome-nickel, dont nous parlons plus loin.

Les aciéries J. Holtzer ont donné les renseignements suivants sur deux sortes d'aciers au chrome qu'ils fabriquent.

Acier N recuit :

R..............................	55,60
E..............................	30,35
A 0/0..........................	22,18

Acier ND recuit :

R	65,70
E	35,40
A 0/0	17,13

Enfin les aciers renfermant

C	0,900 à 1,2
Cr	1,5 à 2

sont utilisés pour les billes et les cuvettes de roulement.

ACIERS AU TUNGSTÈNE

Étude théorique. — COURBE DE FUSIBILITÉ. — M. Otto Böhler a montré que le point de fusion s'abaisse quand la teneur en tungstène augmente, et il y a proportionnalité entre les deux variations comme pour le carbone ; mais le tungstène a une influence bien moindre : 183 grammes de tungstène équivalent à 12 grammes de carbone ; l'abaissement du point de fusion est inversement proportionnel au poids moléculaire, suivant la loi de Raoult.

COURBES DE REFROIDISSEMENT. — D'après les déterminations faites, il semble que le tungstène tende à relever les points de transformation du carbone.

A_3 paraît se rapprocher de la valeur qu'il a pour le fer et tend ensuite à disparaître.

De plus, la position des points critiques varie énormément avec le cycle des températures antérieures et de la vitesse de refroidissement, comme pour les aciers au chrome.

M. Osmond cite l'exemple d'un acier dont la composition est la suivante :

C	0,42
W	6,25
Si	0,05
S	0,01
Ph	0,02
Mn	0,28

Lorsqu'il est refroidi à partir de 920°, cet acier donne deux points critiques, l'un vers 690°, l'autre vers 650°.

Lorsqu'il a été chauffé à 1.015°, le premier point est à peu près le même (670°); mais le second s'abaisse à 625° environ. Lorsqu'on le porte à 1.210°, le premier point critique n'est presque plus sensible; le second reste très accentué et s'abaisse à 500°. Le point critique inférieur paraît bien correspondre au point de recalescence des aciers au carbone.

D'autre part, M. Otto Böhler, utilisant la méthode de Roberts-Austen, a montré qu'un acier contenant 0,850 0/0 de carbone et 7,78 0/0 de tungstène présente deux points critiques (710 et 550°); le premier est visible seulement si le métal n'a pas été chauffé au-dessus de 1.100° environ. Le second n'apparaît que si la température a dépassé 1.000°. Entre ces deux températures, on voit les deux points.

De plus, la prolongation du chauffage à une température donnée équivaut, au point de vue de la position et de la forme des points critiques, à un chauffage plus court à une température supérieure.

Métallographie (Album, Pl. XVIII). — Nous résumerons les recherches que nous avons faites sur ce sujet : la micrographie des aciers au tungstène normaux est particulièrement simple.

Si l'on considère les aciers à 0,200 0/0 de carbone, de 0 à 10 0/0 de tungstène, ils ont même constitution que les aciers au carbone ; mais la perlite est plus déliée que dans ceux-ci ; même à un faible grossissement, on aperçoit les lamelles alternantes de ferrite et de cémentite (Phot. 69, Pl. XVII).

A 10 0/0 de tungstène on voit des lamelles ou points extrêmement fins, qui apparaissent en blanc à l'acide picrique.

C'est ce constituant que l'on rencontre dans tous les aciers contenant jusqu'à 40 0/0 de tungstène (Phot. 70, Pl. XVIII).

Pour les aciers à environ 0,800 0/0 de carbone, de 0 à 5 0/0 de tungstène, on trouve de la perlite.

Dès 5 0/0, on voit apparaître le constituant spécial : tantôt il est en points extrêmement petits, généralement en filaments déliés; parfois même quelques grains ont échappé au traitement mécanique et ont gardé une forme cristalline très nette (Phot. 71, Pl. XVIII).

L'acier à 39,9 0/0 de tungstène n'a pu être forgé; il présente des particularités micrographiques très intéressantes; les cristaux du constituant spécial ont pu se former lentement et se développer pendant le refroidissement, et, comme ils n'ont pu être brisés par le traitement mécanique, ils ont gardé une netteté très grande (Phot. 72, Pl. XVIII).

En résumé, la micrographie des aciers au tungstène conduit à la subdivision suivante :

CLASSES	MICROSTRUCTURES	ACIERS A 0,200 DE CARBONE	ACIERS A 0,800 DE CARBONE
1re	Perlite.............	De 0 à 10 0/0 W	De 0 à 5 0/0 W
2e	Constituant spécial se présentant en grains ou filaments blancs.	W > 10 0/0	W > 5 0/0

Un seul point reste obscur, c'est la nature du constituant spécial. Les recherches micrographiques que nous venons de

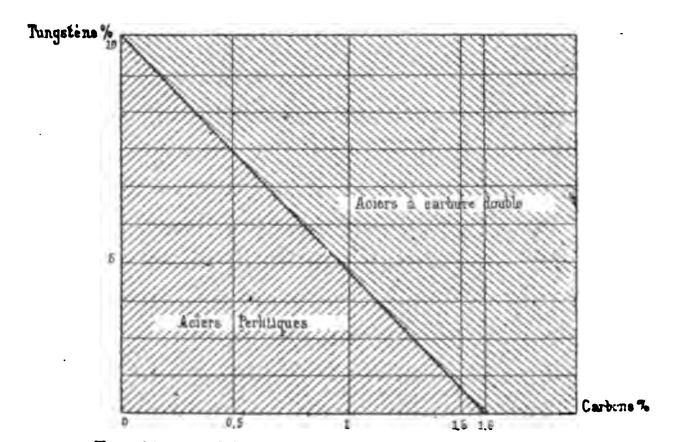


FIG. 113. — Diagramme des aciers au tungstène.

résumer nous donnent déjà une première indication; en effet le point auquel apparaît ce constituant dépend de la somme C + W.

Il semble donc bien, *a priori*, que ce composé doive être un carbure.

De plus, il se rapproche, par certaines propriétés, de la cémentite; c'est ainsi qu'il apparait, par polissage en bas-relief, et que le picrate de soude en solution alcoolique le colore en noir.

Enfin on fait apparaître ce constituant par simple cémentation d'un acier perlitique.

C'est donc bien un carbure.

Ces recherches nous conduisent naturellement à un diagramme extrêmement simple (*fig.* 113). La droite AB, qui part du point 1,600 de carbone, pour arriver au point 10 de tungstène, sépare le plan en deux zones distinctes : l'une correspond aux aciers perlitiques; l'autre, aux aciers à carbure.

Magnétisme. — Les expériences faites par Mme Curie ont montré que les points de transformation magnétiques varient peu avec le pourcentage en tungstène; ces points sont un peu plus hauts que pour les aciers ordinaires à même teneur en carbone; les écarts entre les températures de transformation au chauffage et au refroidissement sont un peu plus grands que dans les aciers ordinaires.

Voici les résultats obtenus par Mme Curie :

COMPOSITION		POINTS DE TRANSFORMATION		DIFFÉRENCE
C	Tu	AU CHAUFFAGE	AU REFROIDISSEMENT	
0,76	2,7	746	714	32
1,02	2,7	721	684	37
1,11	2,7	725	687	38
0,55	2,9	750	708	42
1,53	3,5	722	696	26
0,59	5,5	740	705	35
1,96	7,7	732	697	35

Dureté. — M. Otto Böhler a montré que la dureté initiale varie peu avec la teneur en tungstène et que la dureté après trempe est sensiblement constante.

Voici les résultats obtenus par M. Böhler.

Composition C	Composition W	Dureté avant trempe	Dureté après trempe	Différences
0,85	0,46	1,07	2,44	1,37
0,86	1,93	1,06	2,52	1,46
0,81	1,85	1,14	2,63	1,49
0,66	3,11	1,06	2,41	1,42
0,68	7,63	1,11	2,41	1,30
0,93	1,03	0,99	2,70	1,81
0,82	3,95	1,13	2,36	1,23
0,75	7,23	1,13	3,23 (?)	2,10 (?)
1,16	7,05	1,44	3,39 (?)	1,95 (?)
1,14	14,12	non malléable		
0,95	0,64	0,85	2,10	1,25
0,85	7,78	1,30	2,69	1,39

Étude industrielle. — Fabrication. — La fabrication des aciers au tungstène ne présente aucune difficulté particulière. On utilise un four à creusets qui chauffe bien.

Nous parlerons plus loin, en détail, des matières premières qui peuvent être utilisées.

Disons cependant de suite qu'autrefois on employait le tungstène pulvérisé. Mais les pertes par oxydation étaient très grandes. A l'heure actuelle on part des ferro-tungstènes.

Propriétés mécaniques. — Les aciers au tungstène ont été l'objet de remarquables recherches de la part de M. Hadfield, qui a présenté sur ce sujet un mémoire à la réunion de septembre 1903 de l'Iron and Steel Institute.

Nous donnons ici les résultats résumés de nos recherches dans une série de diagrammes (*fig.* 114 à 117).

De ces résultats on doit conclure que :

1° Les aciers perlitiques présentent une charge de rupture d'autant plus élevée qu'ils contiennent plus de tungstène ; la

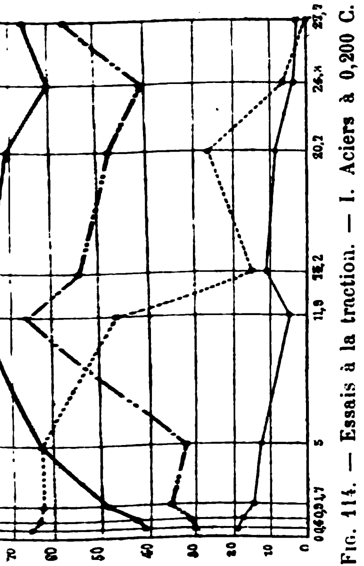


Fig. 114. — Essais à la traction. — I. Aciers à 0,200 C.

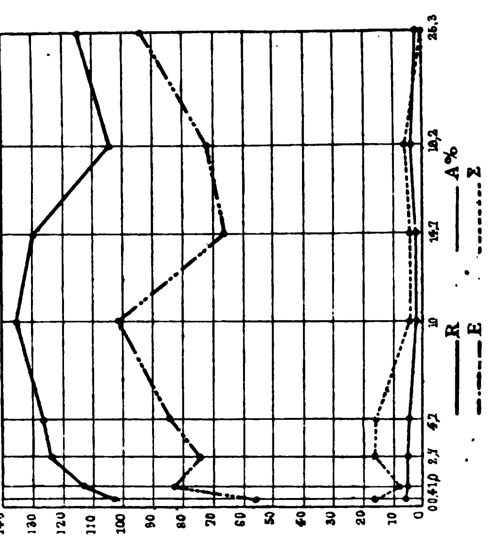


Fig. 115. — Essais à la traction. — II. Aciers à 0,800 C.

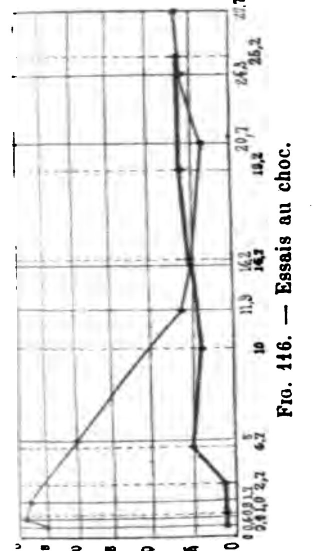


Fig. 116. — Essais au choc.

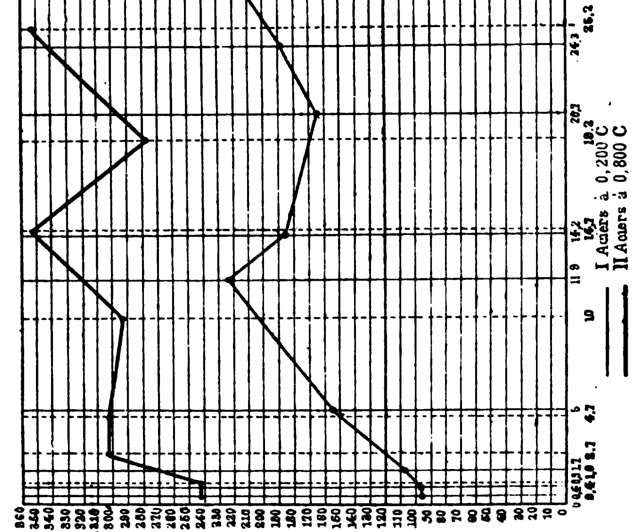


Fig. 117. — Essais à la dureté.

Fig. 114 à 117. — *Essais sur aciers au tungstène normaux.*

limite élastique ne semble pas croître aussi rapidement; les strictions et les allongements diminuent peu ; ils ne sont pas plus fragiles au mouton Frémont que les aciers au carbone; leur dureté est généralement plus élevée que celle des aciers ordinaires à même teneur en carbone;

2° Les aciers renfermant le carbure ont des charges de rupture élevées, et cela d'autant plus qu'ils renferment plus de carbone; mais ces charges ne vont pas en augmentant avec le pourcentage de tungstène. Les limites élastiques sont relativement basses, les allongements et les strictions sont très faibles. Ces aciers sont sur la limite des aciers fragiles; ils ont une résistance au choc parfaitement constante (6 kilogrammètres), et cela quelles que soient leur teneur en carbone et leur teneur en tungstène.

Enfin ils ont une dureté d'autant plus forte qu'ils renferment plus de carbone.

Influence des traitements. — *Trempe.* — La trempe a même action sur les aciers perlitiques que sur les aciers au carbone; il est à noter cependant que, toutes choses égales d'ailleurs, son action se fait sentir avec une intensité d'autant plus grande que la teneur en tungstène est plus élevée.

Sur les aciers à carbure double, la trempe à 850° produit une martensite extrêmement fine et laisse une partie du carbure non dissous, du moins lorsque la teneur en tungstène est assez élevée. Plus la température de trempe est supérieure à 850°, moins la quantité de carbure respectée par la trempe est importante. Après trempe l'acier possède une charge de rupture, une limite élastique et une dureté beaucoup plus élevées que lorsqu'il est normal.

Les premiers aciers à carbure double prennent superficiellement la trempe à l'air; c'est dire qu'à la surface il se forme des aiguilles de martensite, lorsqu'on chauffe aux environs de 1.000° et qu'on refroidit à l'air.

Recuit. — Le recuit adoucit tous les aciers au tungstène.

Cémentation. — Par cémentation suffisament prolongée d'un acier perlitique on fait apparaître le carbure double de fer

et de tungstène, en lieu et place de la cémentite ordinaire.

Utilisations. — Les emplois actuels des aciers au tungstène sont de deux sortes :

1° La confection des outils ;

2° La fabrication des ressorts ;

3° La préparation des aimants permanents.

Les aciers au tungstène pour outils ne présentent pas avec netteté le phénomène que l'on appelle la *trempe à l'air* et que nous étudions plus loin.

Ils doivent donc être trempés par les moyens ordinaires, eau, huile, etc.

Les aciers employés ordinairement pour la confection des outils ont pour composition :

C....................	0,700 à 1,200
W....................	2 à 3 0/0

La composition moyenne des aciers au tungstène à ressorts est la suivante :

C..........................	0,470
Mn..........................	0,220
Si..........................	0,200
W..........................	0,600

Un tel acier non trempé donne :

R............................	80
E............................	60
A 0/0	14

Trempé et recuit à 500°, il donne :

R............................	140
E............................	100
A 0/0	7

Nous ne croyons pas que ces aciers présentent de grands avantages sur les aciers au silicium, qui, nous le disons plus loin, sont couramment employés pour le même usage.

Leur prix est très élevé ; de plus, ils offrent, après trempe

et recuit, une résistance au choc plutôt moindre que les aciers au silicium.

Les aciers employés pour la préparation des aimants permanents ont pour composition :

Ou :

C.	1 à 1,2
W.	7 à 8

ou :

C.	0,600 à 0,700
W.	4 à 6

Certains aciers au tungstène contiennent du manganèse, tel un acier à outils de Bœhler.

C.	2 0/0
Mn	2 0/0
W.	7,7

ACIERS AU MOLYBDÈNE

Étude théorique. — COURBES DE REFROIDISSEMENT. — Peu de travaux ont été faits sur les points de transformation des aciers au molybdène.

Cependant Mme Curie a donné les points de transformation magnétique de trois de ces aciers :

COMPOSITION		POINTS DE TRANSFORMATION MAGNÉTIQUE		DIFFÉRENCE
C	Mo	Au chauffage	Au refroidissement	
0,51	3,5	730	686	44
1,25	3,4	730	689	41
1,72	3,9	710	683	27

On ne peut rien déduire d'un aussi petit nombre d'observations.

MÉTALLOGRAPHIE (Album, Pl. XIX et XX). — Voici les principaux résultats que nous avons obtenus :

La série des aciers à environ 0,200 0/0 de carbone nous a donné les résultats suivants : de 0,5 à 1 0/0 de molybdène, ils

présentent de la perlite; mais cette perlite est beaucoup plus déliée que dans les aciers au carbone ordinaire (Phot. 73, Pl. XIX). A 2 0/0 de molybdène, on note déjà un changement de structure : la perlite devient extraordinairement divisée; à 5 0/0 de molybdène, on ne voit plus de perlite; on est en présence d'un constituant spécial caractérisé par un vermiculé très ténu. Les aciers à plus haute teneur en molybdène vont tous donner cette même structure. Parfois le traitement

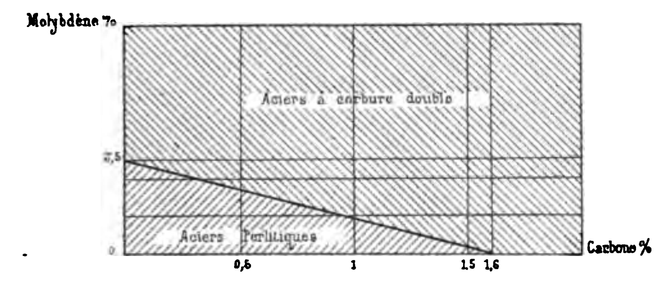


Fig. 118. — Diagramme des aciers au molybdène.

mécanique a épargné quelques cristaux de constituant spécial, que l'on distingue en rognons plus ou moins prononcés.

Dans la série des aciers à 0,700 0/0 de carbone, on a tout d'abord une perlite très divisée. Dès 1,2 0/0 on aperçoit quelques grains blancs isolés du constituant spécial. Ces points blancs s'accentuent au fur et à mesure que le molybdène augmente. A 10 0/0, on voit en dehors des rognons blancs un véritable eutectique qui doit être formé par la ferrite et le constituant spécial (Phot. 74, 75 et 76, Pl. XIX; Phot. 77 et 78, Pl. XX).

Le tableau suivant résume les résultats trouvés par voie micrographique :

CLASSES	MICROSTRUCTURE	ACIERS à 0,200 C	ACIERS à 0,800 C
1re	Perlite.............	De 0 à 2 0/0 Mo	De 0 à 1 0/0 Mo
2e	Constituant spécial.	Teneur en Mo > 2 0/0	Teneur en Mo > 1 0/0

Le seul point qui reste à élucider est la nature du constituant spécial. En tenant, pour les aciers au molybdène, les mêmes raisonnements que pour les aciers au tungstène et en

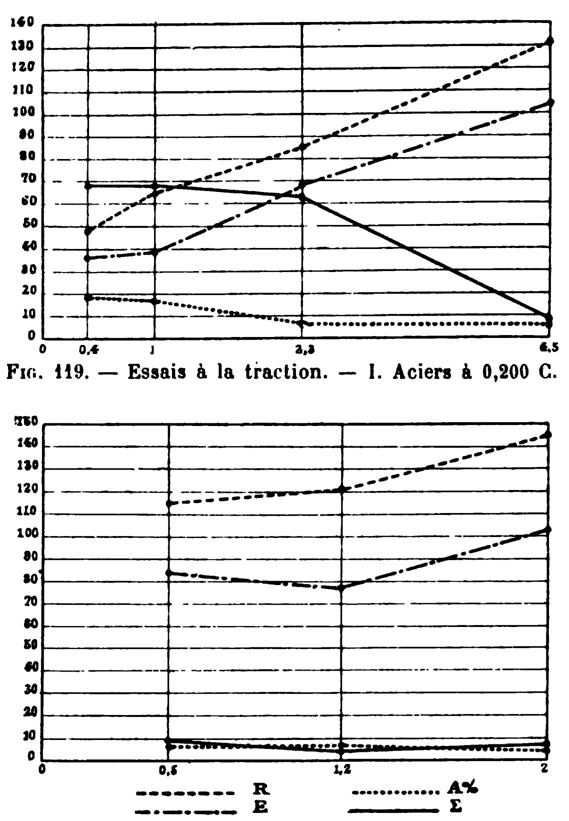


Fig. 119. — Essais à la traction. — I. Aciers à 0,200 C.

Fig. 120. — Essais à la traction. — II. aciers à 0,800 C.

Fig. 119 et 120. — Aciers au molybdène normaux.

répétant les mêmes expériences que celles que nous avons déjà décrites à ce sujet, nous avons conclu à l'existence d'un carbure.

Le diagramme est, en tous points, semblable à celui des aciers au tungstène (*fig.* 118). Mais la droite AB, qui sépare les aciers perlitiques des aciers à carbure double, part du même pourcentage de carbone pour arriver au point 2,5 de molybdène.

Étude industrielle. — Fabrication. — La fabrication des aciers au molybdène est semblable à celle des aciers au tungs-

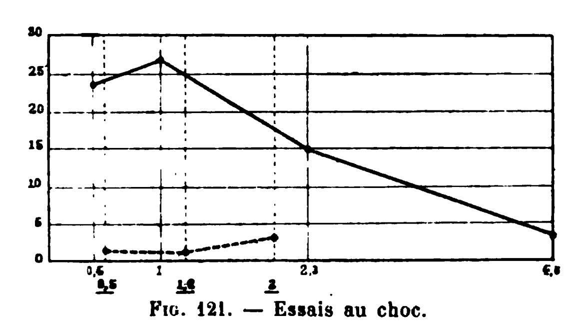


Fig. 121. — Essais au choc.

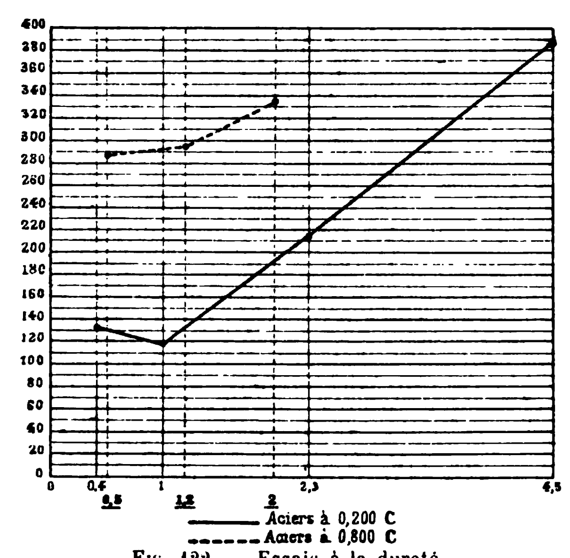


Fig. 122. — Essais à la dureté.

Fig. 121 et 122. — Aciers au molybdène

tène. Nous n'avons rien à ajouter à ce que nous avons déjà dit. Il sera question des matières premières dans le chapitre suivant.

Propriétés mécaniques. — Les résultats des essais mécaniques sont donnés dans une série de graphiques (*fig.* 119 à 122).

Les aciers perlitiques ont une charge de rupture beaucoup plus élevée que les aciers ordinaires; malgré cela, ils ont de beaux allongements et de très belles strictions. Ils ne sont

pas plus fragiles que les aciers au carbone, mais ils sont sensiblement plus durs.

Les aciers à carbure double possèdent des charges de rupture et des limites élastiques extrêmement fortes; ils ont de faibles allongements et strictions; ils sont très fragiles et possèdent une très grande dureté.

Influence des traitements. — Cette influence est sensiblement la même sur les aciers au molybdène que sur les aciers au tungstène, toutes proportions gardées (Phot. 79 et 80, Pl. XX). Nous n'y reviendrons pas.

Utilisations. — Les aciers au molybdène ont été lancés par certaines aciéries avec grand mystère comme aciers à outils. Ils ont été à peu près abandonnés depuis ; ils n'ont pas donné des résultats bien supérieurs à ceux des aciers au tungstène, et leur prix est plus élevé, quoiqu'il faille moins de molybdène que de tungstène. Toutefois certains industriels continuent à utiliser le molybdène ajouté au tungstène.

On utilise des aciers au molybdène comme aimants permanents; ils donnent des résultats bien supérieurs à ceux des aciers aux tungstène. L'un des échantillons nous a donné à l'analyse :

C....................	1,21
Mo....................	3,72

ACIERS AU VANADIUM

Étude théorique. — Métallographie (Album, Pl. XXI et XXII). — Voici les résultats obtenus dans les recherches que nous avons effectuées :

Si l'on considère les aciers renfermant 0,200 0/0 de carbone, on trouve de la perlite semblable à celle des aciers au carbone tant que la teneur en vanadium est inférieure à 0,7 0/0 (Phot. 81, Pl. XXI); mais, dans l'attaque à l'acide picrique, la ferrite semble se colorer en brun, d'autant plus aisément que la teneur en vanadium est plus élevée (Phot. 82, Pl. XXI).

Au-delà de 0,7 0/0 de vanadium, on voit toujours de la perlite, mais on aperçoit très nettement dans cette perlite des grains blancs, qui apparaissent même par polissage en bas-relief.

On voit ces grains blancs envahir de plus en plus la préparation, de telle sorte qu'à 3 0/0 de vanadium on ne voit plus du tout de perlite, mais bien des grains blancs qui affectent presque toujours la forme triangulaire (Phot. 83, Pl. XXI).

Les aciers à 0,800 0/0 de carbone donnent des résultats analogues; seuls, changent les pourcentages en vanadium, pour lesquels on note les changements micrographiques.

On voit que, jusqu'à 0,5 0/0, on obtient de la perlite pure; au-delà de 0,5 0/0 on trouve de la perlite et le constituant spécial. Enfin, à partir de 7 0/0, on ne rencontre plus du tout de perlite; on ne voit plus que le constituant spécial très développé et en abondance d'autant plus grande que le pourcentage du vanadium est plus élevé (Phot. 86, Pl. XXII).

Un point assez curieux à noter est la constitution des aciers qui renferment simultanément la perlite et le constituant particulier.

Ils présentent une texture se rapprochant beaucoup des aciers à 0,600-0,700 C, alors qu'ils en contiennent réellement 0,900 à 1 0/0 (Phot. 84, Pl. XXI; Phot. 85, Pl. XXII). Nous en verrons ultérieurement l'explication. En résumé, la constitution des aciers au vanadium bruts de forge est résumée dans le tableau suivant:

MICROSTRUCTURE	ACIERS A 0,200 DE CARBONE	ACIERS A 0,800 DE CARBONE
Aciers à perlite seule.....	0 à 0,7 0/0 de Va	0 à 0,5 0/0 de Va
Aciers à perlite et à constituant spécial...........	0,7 à 3 0/0 de Va	0,5 à 7 0/0 de Va
Aciers à constituant spécial.	Va > 3 0/0	Va > 7 0/0

Il reste à définir le constituant spécial; nous n'avons pas cherché à l'isoler; mais nous pouvons d'ores et déjà certifier que c'est un carbure. Les expériences de cémentation le prouvent très nettement. De plus, nous avons vu que la quantité de ce

constituant augmente avec la teneur en carbone, ce qui forme une première preuve à l'appui de cette assertion. Ceci explique bien pourquoi nous avons noté que la structure de certains aciers conduisait à une teneur en carbone inférieure à la teneur réelle ; ces aciers sont, en effet, ceux qui renferment simultanément le constituant spécial et de la perlite ; ce constituant spécial absorbe une partie du carbone de l'acier, de telle sorte que la quantité de perlite qui reste ne correspond pas du tout à la teneur réelle de l'acier.

De plus, ajoutons de suite que les aciers à haute teneur

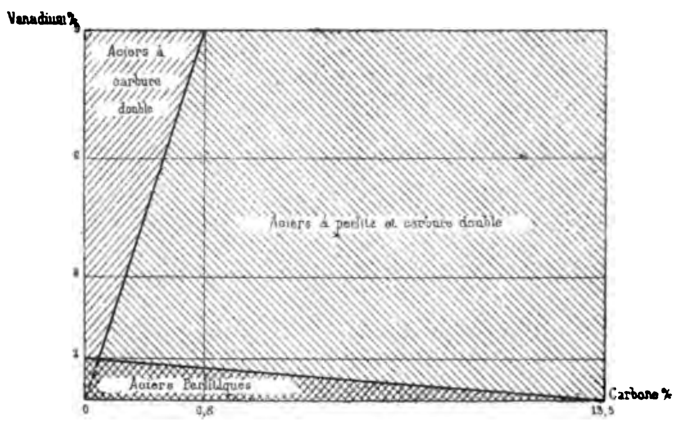


Fig. 123. — Diagramme des aciers au vanadium.

en vanadium sont très hétérogènes ; nous avons examiné très soigneusement une même barre d'acier à 0,120 0/0 de carbone et 10 0/0 de vanadium : plus nous avancions vers une certaine extrémité de la barre, plus nous rencontrions, cela jusqu'à une certaine limite, des grains de carbure double. Il semble que le carbure soit de faible densité et ait une tendance très nette à remonter dans le bain. Ceci tend enfin à prouver que ce carbure existe non dissous, même quand le fer est à l'état liquide ; c'est bien ce que semblent prouver les expériences de trempe. Certaines parties de la barre accusent une microstructure se rapprochant de la ferrite ; mais les polyèdres se colorent toujours avec une certaine rapidité par l'acide picrique.

En résumé, les aciers à haute teneur en vanadium ne sont pas homogènes.

L'examen de quelques autres échantillons d'aciers au vanadium nous a permis de confirmer les résultats des recherches précédentes, qui semblent pouvoir être résumés dans le diagramme de la figure 123.

On y trouve tout d'abord la droite, qui sépare les aciers perlitiques des aciers qui renferment du carbure. Mais ceux-ci doivent être divisés en deux groupes : les aciers dont tout le carbone est à l'état de carbure et ceux qui renferment et du carbure de vanadium et de la perlite. L'autre droite, qui découle des recherches que nous venons de décrire, semble bien indiquer cette séparation. Elle montre que, plus l'acier renferme de carbone, plus il faut de vanadium pour que tout le carbone soit à l'état de carbure.

Étude chimique. — Dans la *Revue d'Artillerie*, M. le capitaine Nicolardot a montré que l'attaque par les acides étendus des alliages de fer ou de vanadium fournissait des résultats très différents, suivant que les alliages contenaient ou non du carbone.

Les ferrovanadiums préparés par l'alumino-thermie et ne contenant pas de carbone se dissolvent très facilement sans laisser de résidu. Au contraire, les aciers et les ferrovanadiums contenant du carbone (généralement préparés au four électrique) laissent un résidu qui contient presque tout le vanadium, dans certains cas même, tout le vanadium, quand on attaque les aciers à faible teneur en vanadium (moins de 7 0/0) avec une solution aqueuse d'acide chlorhydrique ou d'acide sulfurique ; même à l'abri de l'air, on obtient un résidu spongieux contenant du carbone, du fer et du vanadium et dont la densité ne dépasse pas 2,88.

Au contraire, avec les aciers à forte teneur en vanadium et surtout avec les ferrovanadiums préparés au four électrique et riches en carbone, le résidu obtenu est dense ; à l'aide d'une attaque par l'acide chlorhydrique gazeux dans l'alcool absolu, le capitaine Nicolardot a pu isoler, dans certains aciers d'une

teneur en vanadium même inférieure à 7 0/0, un résidu analogue.

La densité de ce composé varie suivant la quantité de carbone (ou de fer) qu'il contient, de 5,53 à 5,6. Sa composition est variable, c'est toujours un carbure de vanadium ; mais la proportion de carbone paraît augmenter quand la température à laquelle l'alliage est préparé s'élève et surtout quand la teneur totale en carbone est plus grande.

Un échantillon de ferrovanadium contenant 16 0/0 de carbone et 30 0/0 de vanadium a fourni un carbure de densité égale à 5,53 et dont la formule se rapproche de V^4C^3 (15 0/0 de C).

D'un autre échantillon de ferrovanadium de même teneur en vanadium, mais ne contenant que 8 0/0 de carbone, on a retiré un résidu de densité égale à 5,64 et de formule V^3C^2 (13,6 0/0 C).

Dans les aciers moins riches en carbone et préparés aussi à moins haute température, le résidu aurait une formule se rapprochant de V^2C (11,8 0/0 de C).

Peut-être n'y a-t-il que deux carbures se mélangeant en proportions variables ?

Le capitaine Nicolardot fait d'ailleurs remarquer que ses recherches confirment celles de M. Moissan[1], qui a montré que, sous l'influence d'une élévation de température, le vanadium se combinait de plus en plus au carbone en fournissant des composés paraissant de plus en plus réfractaires. D'après les chiffres publiés par ce savant les carbures suivants, V^2C^2, V^3C^4, se formeraient dans l'arc électrique ; à plus basse température, on aurait V^2C, V^3C^2, V^4C^3. C'est à l'existence de ces carbures, d'une densité inférieure à l'acier, beaucoup moins fusibles, qu'il y a lieu d'attribuer la non-homogénéité et la fragilité des aciers au vanadium à forte teneur.

Dans les aciers à faible teneur en vanadium, le carbure de vanadium, V^3C^2 ou plus probablement V^2C, se combine avec de la cémentite pour former un carbure double peu attaquable

1. *Comptes Rendus*, t. CXVI, p. 1255 ; 1893.

aux acides, dans lequel se trouve presque tout le vanadium.

La proportion de cémentite augmente au fur et à mesure que la teneur en vanadium diminue. Tels sont les premiers résultats des recherches effectuées par le capitaine Nicolardot.

Elles confirment complètement notre étude.

Étude industrielle. — Propriétés mécaniques. — Les propriétés mécaniques que nous allons décrire n'ont pas été déterminées sur aciers bruts de forge, mais bien sur aciers portés à 900° et refroidis lentement, c'est-à-dire ayant subi un léger recuit.

Nous avions vu, en effet, que les aciers au vanadium sont profondément modifiés, plus que les autres aciers, par le traitement mécanique; comme on est dans l'impossibilité de comparer l'état d'écrouissage, il est absolument nécessaire de le détruire par un recuit.

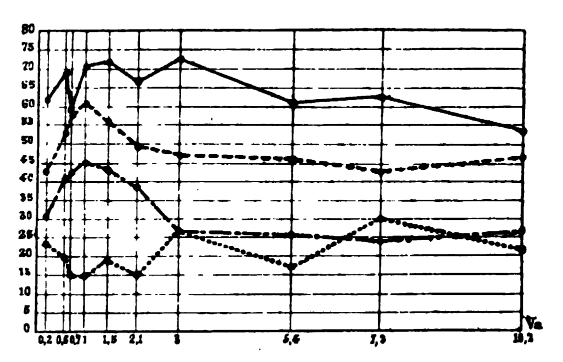


Fig. 124. — Essais à la traction. — Aciers à 0,200 C.

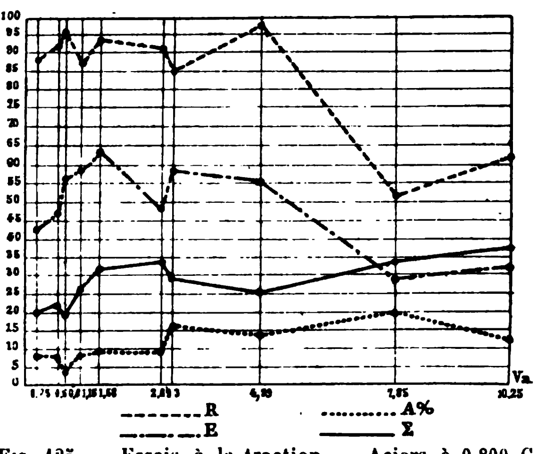


Fig. 125. — Essais à la traction. — Aciers à 0,800 C.

Fig. 124 et 125. — Aciers au vanadium normaux.

De plus, nous dirons de suite que les aciers à haute teneur en vanadium présentent une hétérogénéité extraordinaire,

mais qui s'explique fort bien par la faible densité du carbure double, qui tend probablement à remonter dans le bain et est certainement réparti d'une façon inégale dans la masse d'acier, ainsi que le prouve l'étude micrographique.

Les résultats que nous donnons dans le tableau sont des résultats obtenus avec quelques-uns des aciers à haute teneur en vanadium, dont certains peuvent paraître surprenants.

NUMÉROS	CARBONE	VANADIUM	R	E	A 0/0	Σ
			34,5	15,5	23	61,9
1	0,382	5,37	48,9	25,8	14	56,2
			55,9	35,3	17	61,2
			28,8	20,2	21	66,9
2	0,130	7,37	38,6	24,8	30	64,7
			52,9	33,8	17	58,3
			30,3	21,8	22	49,2
			46,5	26,3	21	53,1
3	0,120	10,27	50,7	34,3	15	38,2
			54,7	47,5	21,5	44,8
			30,3	13,4	16	25,6
4	0,737	7,85	50,4	27,4	15	22,3
			54,7	47,3	22	44,5
			42 »	16,8	10	13,3
5	0,858	10,25	59,2	45,6	7	9,2
			70,5	31,6	10	27,5

Un point des plus importants à noter est que la charge de rupture et la limite élastique vont en croissant d'un bout d'une barre à l'autre et qu'à ces valeurs de plus en plus grandes correspondent, aux sections de cassure, des teneurs en carbure de plus en plus importantes. L'hétérogénéité de ces aciers paraît donc bien être due au carbure de faible densité, qui tend à remonter dans le bain d'acier.

Les graphiques ci-joints (*fig.* 124 à 127) donnent les résultats des essais pratiqués. En faisant abstraction des variations de la teneur en carbone (qui apparaissent sur les diagrammes), on est conduit aux conclusions suivantes :

1° Tant que le vanadium est en solution dans le fer, la

charge de rupture et la limite élastique augmentent, les allongements et les strictions décroissent lentement, la fragilité et la dureté augmentent un peu avec le pourcentage de vanadium.

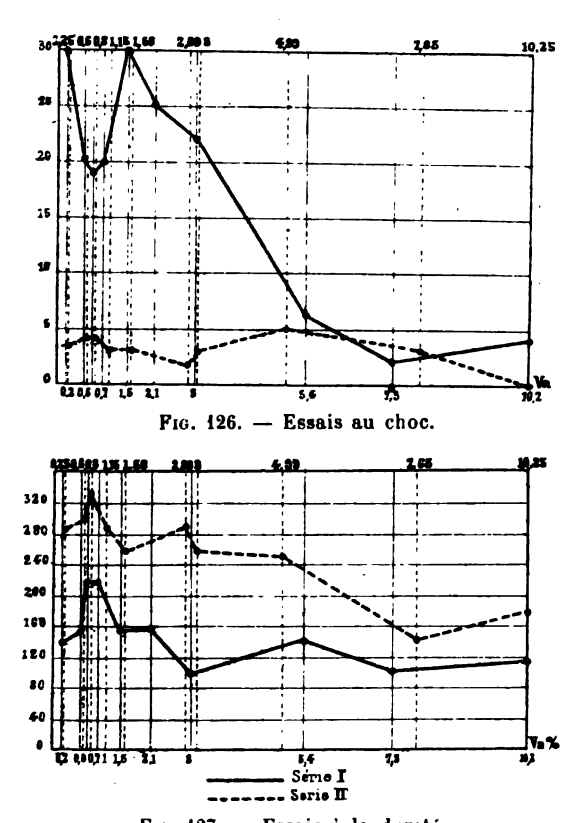


FIG. 126. — Essais au choc.

FIG. 127. — Essais à la dureté.

FIG. 126 et 127. — Aciers au vanadium normaux.

2° Lorsque le vanadium est à l'état de carbure et tant qu'il reste encore de la perlite, la charge de rupture, la limite élastique décroissent, la fragilité et la dureté paraissent diminuer avec le pourcentage de vanadium.

3° Quand tout le carbone est à l'état de carbure, on a des propriétés qui ne varient guère avec la composition de l'acier :

celui-ci possède une charge de rupture et une limite élastique plutôt faibles, d'assez beaux allongements ; cependant, il est très fragile.

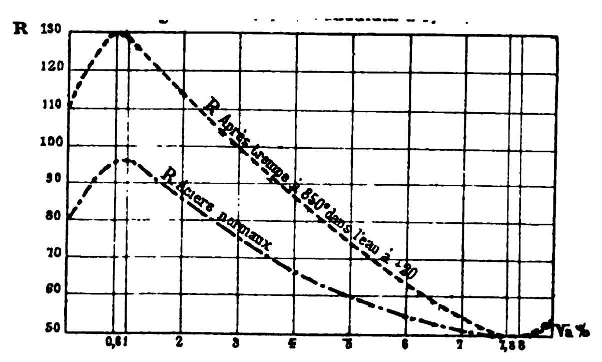


Fig. 128. — Aciers au vanadium à 0,800 C.

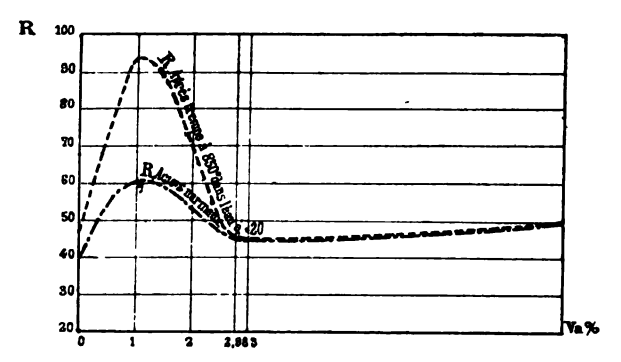


Fig. 129. — Aciers au vanadium à 0,200.

Fig. 128 et 129. — Influence de la trempe sur la charge de rupture des aciers au vanadium.

Influence des traitements. — *Trempe.* — La trempe à 850° modifie tous les aciers perlitiques en donnant de la martensite.

Avec les aciers qui renferment simultanément de la perlite et du carbure double, on obtient de la martensite, et le carbure double reste inaltéré.

Enfin les aciers dans lesquels tout le carbone se trouve à l'état de carbure double ne subissent aucune transformation

par la trempe, et cela quelle que soit la température de trempe, quelle que soit la vitesse de refroidissement (Phot. 87, Pl. XXII).

Les essais mécaniques donnent des conclusions non moins intéressantes.

Les aciers perlitiques sont d'autant plus durcis par la trempe que leur teneur en vanadium est plus élevée (*fig.* 128 et 129) Parfois l'influence de la trempe est extrêmement importante. Puis l'influence de la trempe diminue dès qu'apparait le carbure double, et bientôt elle devient nulle. Ceci coïncide d'une façon parfaite avec le moment où tout le carbone est à l'état de carbure double, où par conséquent la trempe n'amène aucune transformation dans la constitution.

Recuit. — Les aciers perlitiques ne subissent une transformation que s'ils sont très carburés. Il y a précipitation de carbone à l'état de graphite. C'est un phénomène analogue à celui que nous rencontrerons dans les aciers au silicium (Phot. 88, Pl. XXII). Les aciers à carbure double ne subissent aucune transformation (Phot. 87, Pl. XXII).

Tous sont adoucis par recuit.

Écrouissage. — Les aciers au vanadium sont très sensibles à l'écrouissage; c'est une de leurs caractéristiques. Leur fragilité, notamment, augmente d'une façon considérable; il est très fréquent de trouver des aciers qui, bruts de forge, donnent 3 kilogrammètres et qui, portés à 900° et refroidis lentement (acier normal), donnent 30 kilogrammètres.

Cémentation. — Dans la cémentation des aciers au vanadium, on voit apparaître le carbure signalé. Tout se déduit d'ailleurs du diagramme que nous avons donné.

Utilisations. — Les recherches précédentes montrent très nettement qu'un acier au vanadium présentant du carbure n'offre aucun intérêt industriel. On peut donc, d'ores et déjà, déclarer que les seuls aciers au vanadium susceptibles d'applications sont ceux renfermant moins de 0,7 0/0 de vanadium.

En somme, dans ces conditions, la caractéristique du vanadium est de durcir l'acier, d'augmenter sa charge de rup-

ture et sa limite élastique ; en un mot, il joue, à ce point de vue, *un rôle analogue à celui du carbone, et cela avec au moins autant d'intensité que cet élément.* Mais le vanadium possède une autre caractéristique qui le rend particulièrement intéressant : *tandis qu'il augmente très rapidement la charge de rupture et la limite élastique, il ne diminue pas les allongements et les strictions, et il n'apporte aucune fragilité.*

Tout ceci s'entend pour les aciers renfermant moins de 0,7 0/0 de vanadium.

Il n'est donc pas douteux que l'utilisation sur une grande échelle des aciers au vanadium, dont la fabrication ne paraît présenter aucune difficulté spéciale, ne dépende que du prix de revient.

Or le prix de vente du ferro-vanadium baisse constamment. Il y a peu de temps, on le payait à raison de 110 francs le kilogramme contenu ; actuellement une Société américaine ne le vend plus que 60 francs. Si l'on veut bien se souvenir que les aciers au vanadium les plus intéressants sont ceux contenant de 0,2 à 0,5 de vanadium, on voit que le prix dont sera augmenté l'acier au carbone ordinaire par l'addition du vanadium sera de 12 à 30 francs les 100 kilogrammes, les pertes pouvant être négligées.

Mais il ne faut pas oublier que les aciers au vanadium sont très sensibles aux traitements thermiques et mécaniques et qu'ils ne sauraient être utilisés sans avoir été soigneusement recuits à 900° et refroidis lentement.

En résumé, nous pensons que les aciers au vanadium renfermant moins de 0,7 0/0 de vanadium ont devant eux le plus brillant avenir, en tous points comparable à celui des aciers au nickel perlitique. Nous dirons plus loin quelques mots de certains aciers plus complexes au vanadium.

ACIERS AU SILICIUM

Etude théorique. — COURBES DE REFROIDISSEMENT. — M. Osmond a montré que le point A_3 tend à remonter et à se rapprocher du point critique du fer pur. De plus, ce point est d'autant moins sensible que le pourcentage de silicium est plus élevé. Vers 2 0/0, on ne peut plus le constater. Le point A_2 tend à s'abaisser, tandis que le point A_1 tend à remonter pour coïncider avec le point A_2.

Dans le fort intéressant mémoire qu'il a présenté à la réunion de septembre 1903 de l'Iron and Steel Institute, M. Thomas Baker a étudié la variation des points de transformation.

Il constate comme M. Osmond, comme M. le professeur Arnold que 5 0/0 de silicium font disparaître le point A_3. Le point A_2 se déplace d'environ 8° pour chaque 1 0/0 de silicium. — Quant au point A_1, il était très peu visible dans les aciers étudiés par M. Baker, ceux-ci étant extrêmement peu carburés.

Métallographie (Album, Pl. XXIII et XXIV). — Voici les résultats des recherches que nous avons faites sur ces alliages :

Toutes les attaques ont été faites à l'acide picrique pour les teneurs faibles, à l'acide chlorhydrique à partir de 5 0/0 de silicium. Il arrive souvent qu'un acier au silicium parfaitement poli montre, après attaque, des raies de polissage très accentuées. De plus, il se produit souvent, dans l'attaque, de la silice qui recouvre la surface et fait apparaître, en se desséchant, des lignes de retrait que l'on pourrait prendre pour des bords de polyèdres. Il faut alors laver à l'acide fluorhydrique.

La série des aciers renfermant environ 0,200 0/0 de carbone nous a donné les résultats suivants :

De 0,5 à 5 0/0 de silicium, on a la structure perlitique (Phot. 89, Pl. XXIII). A 5 0/0 de silicium, on aperçoit des taches blanches par polissage en bas-relief, et on distingue nettement avant toute attaque des points noirs très fins, qui sont du graphite (Phot. 90, Pl. XXIII). Après attaque, on retrouve ces constituants et de la

perlite qui se trouve hors des taches blanches. Pour une teneur plus élevée en silicium, mais inférieure à 20 0/0, on n'a plus que des plages blanches bordées de graphite ; parfois on distingue autour de ce graphite quelques grains très brillants, toujours en très petites quantités (Phot. 91, Pl. XXIII).

Dans un acier à 20 0/0, on voit nettement du graphite et deux constituants, dont l'un très bien cristallisé (Phot. 92, Pl. XXIII). Pour une teneur en silicium très grande, on rencontre des cristaux très bien définis entourés d'un eutectique ; il sont d'autant plus importants que le silicium est en plus grande quantité.

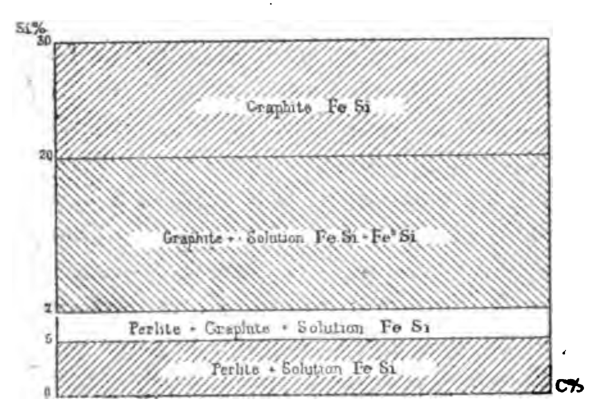


Fig. 130. — Diagramme des aciers au silicium.

L'étude des aciers renfermant 0,800 0/0 de carbone conduit identiquement aux mêmes résultats, à cela près que la perlite ou le graphite s'y trouvent en plus importante quantité (Phot. 93, 94, Pl. XXIV).

Il faut donc conclure de suite que la teneur en silicium a seule une influence sur la constitution de ces aciers et que le carbone n'en a aucune.

Nos recherches sur les aciers au silicium sont résumées dans le diagramme de la figure 130, qui est extrêmement simple. Le plan est divisé en quatre régions par des parallèles à l'axe des x (le carbone n'a, en effet, aucune influence sur la constitution de ces aciers), menées par les points 5, 7 et 20 0/0 de silicium. Au-dessous de la première nous avons tout le carbone combiné ; entre la seconde droite et la première, il y a une partie du carbone qui est combinée, l'autre qui est à l'état de graphite. Au-dessus de la seconde droite, tout le

carbone est à l'état de graphite; l'espace compris entre la deuxième et la troisième droite correspond aux aciers dont le silicium est à l'état de solution et qui peuvent contenir, en outre, un peu du composé Fe^3Si. Au-dessus de cette troisième droite se trouvent les aciers contenant le composé FeSi. Toutefois nous notons une divergence, que nous ne saurions expliquer, entre la composition de certains ferro-siliciums et de certains aciers à même teneur en silicium.

Résistance électrique. — M. Le Chatelier a montré que le silicium amène une augmentation de résistance de 14 microhms par 1 0/0 de silicium en poids. Le silicium est à l'état de solution solide dans le fer pour les aciers à faible teneur.

Étude chimique. — Étant données les importantes recherches qui ont été faites sur les ferro-siliciums industriels et qui ont conduit à admettre, comme nous le verrons, l'existence des trois composés Fe^2Si, FeSi et $FeSi^2$, nous avons jugé nécessaire de procéder à l'étude chimique des aciers au silicium. Avant tout, nous avons repris l'étude des ferro-siliciums et nous avons isolé les trois composés déjà connus.

Un ferro-silicium à 12 0/0 de silicium traité par le chlorure de cuivre ammoniacal nous a laissé un résidu représentant à peu près le tiers du poids primitif correspondant bien exactement à la formule Fe^2Si.

Un ferro-silicium renfermant 30 0/0 de silicium traité par l'acide chlorhydrique étendu de son volume d'eau nous a donné un résidu, qui, lavé à la potasse étendue, puis à l'acide acétique, se sépare à l'aimant en deux parties; la partie aimantée correspond nettement à la formule FeSi.

Enfin un ferro-silicium à 35 0/0 de silicium nous a donné le composé $FeSi^2$.

L'étude chimique de nos aciers nous a conduit aux résultats suivants :

1° Les aciers qui renferment moins de 20 0/0 de silicium ne contiennent pas ou ne renferment que des quantités minimes du composé Fe^2Si. C'est ainsi que l'acier à 0,350 de carbone

et 13,9 0/0 de silicium en contient des traces ; traité par le chlorure de cuivre ammoniacal, il laisse un résidu qui n'est que la deux ou trois millième partie de la matière traitée.

Les aciers qui contiennent plus de 2 0/0 de silicium, traités comme nous l'avons dit pour le ferro-silicium à 30 0/0 de silicium, laissent une quantité importante du composé FeSi (nos aciers contiennent au maximum 30 0/0 de silicium).

Étude industrielle. — FABRICATION. — La fabrication des aciers au silicium se fait aisément au four Martin sur sole acide. Parfois on utilise même le Bessemer acide.

Toutefois on n'a jamais dépassé une teneur de 2 0/0 de silicium.

Les aciers qui ont servi à nos recherches ont été obtenus au creuset.

Nous verrons dans le chapitre suivant quelles sont les matières premières qui peuvent être utilisées.

PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES. — Les essais n'ont été pratiqués que sur les aciers qui avaient pu être laminés, c'est-à-dire pour la série à 0,200 0/0 de carbone, ceux contenant moins de 7 0/0 de silicium et, pour la série à 0,800 0/0 de carbone, ceux renfermant moins de 5 0/0 de silicium. Les résultats de ces essais sur aciers bruts de forge sont résumés dans les graphiques des figures 131 à 134.

On peut en déduire les conclusions suivantes :

La charge de rupture et la limite élastique sont plus élevées dans les aciers au silicium que dans les aciers ordinaires à même teneur en carbone que les premiers. Toutefois elles ne croissent pas sensiblement avec la teneur en silicium, dès qu'il se trouve un peu de carbone à l'état de graphite, et les allongements et les strictions sont nuls. La résistance au choc des aciers au silicium est faible ; elle devient nulle dès qu'il y a un peu de graphite.

La dureté est plus grande que dans les aciers au carbone, mais elle n'augmente pas avec la teneur en silicium. En un mot, le silicium apporte avec lui certaines propriétés, mais

elles ne se modifient pas sensiblement avec le pourcentage de ce corps, du moins tant qu'il n'y en a pas assez pour qu'une partie du carbone soit précipitée à l'état de graphite.

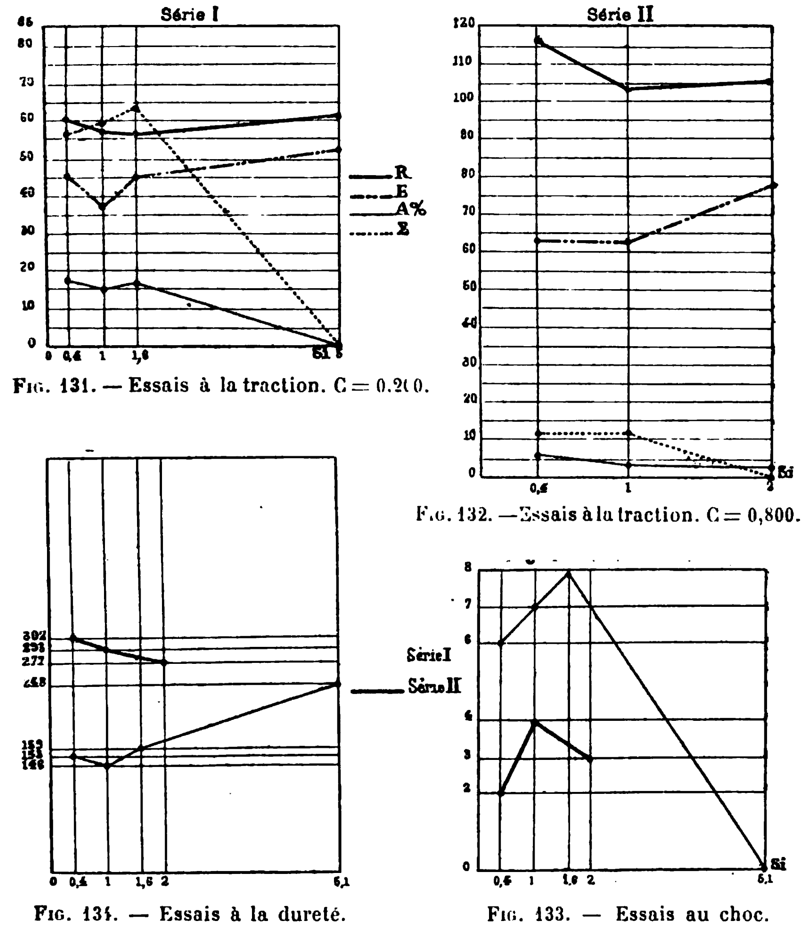


Fig. 131. — Essais à la traction. C = 0,200.

Fig. 132. — Essais à la traction. C = 0,800.

Fig. 134. — Essais à la dureté.

Fig. 133. — Essais au choc.

Fig. 131 à 134. — Aciers au silicium normaux.

Influence des traitements. — *Trempe.* — Les aciers au silicium perlitiques subissent les mêmes transformations que les aciers ordinaires au carbone.

Les aciers dont tout le carbone est précipité à l'état de graphite ne subissent aucune transformation. Quant aux aciers

qui renferment et de la perlite et du graphite, ils montrent après trempe une structure un peu spéciale qui est la même, quelle que soit la température de trempe[1] : les îlots de perlite sont remplacés par des îlots de martensite; le reste est formé de grandes plages blanches ne contenant aucune trace de martensite. Ceci est bien en rapport exact avec la théorie.

Recuit. — Le recuit précipite le carbone combiné à l'état de graphite (Phot. 95 et 96, Pl. XXIV). Le temps de recuit nécessaire pour que tout le carbone soit à l'état de graphite est d'autant plus faible que :

1° La teneur en silicium est plus forte;

2° La température est plus élevée.

Comme pour les fontes (recherches de MM. Charpy et Grenet), nous avons noté que :

1° La séparation du graphite commence à une température d'autant plus basse que la teneur en silicium est plus forte;

2° La séparation de graphite une fois commencée se continue aux températures inférieures à celle où s'amorce la réaction;

3° A température constante la séparation du graphite s'effectue progressivement avec une vitesse d'autant plus faible que la température est plus basse et la teneur en silicium plus faible.

Cémentation. — Les aciers dont tout le carbone est à l'état de graphite peuvent présenter deux cas : ou le temps que dure la cémentation est suffisamment long pour que le dépôt du graphite ait lieu; dans ces conditions, une partie ou même la totalité du carbone sera à l'état de graphite. Ou le temps de cémentation n'est pas suffisant pour produire cet effet; dans ces conditions, la cémentation a lieu comme dans un acier au carbone ordinaire.

Quant aux aciers dont tout le carbone est à l'état de graphite, il n'y a pas absorption de carbone, *la cémentation n'est pas possible.*

UTILISATIONS. — La principale utilisation des aciers au sili-

1. Pourvu, bien entendu, qu'elle soit supérieure au point de transformation A_1.

cium se trouve dans la fabrication des aciers à ressorts.

Ils appartiennent alors à différents types et renferment de 0,400 à 0,700 0/0 de carbone et de 0,5 à 2,5 0/0 de silicium. Il faut remarquer d'ailleurs que les aciers renfermant le moins de carbone sont ceux qui renferment le plus de silicium.

Les deux types les plus généralement fabriqués, du moins en France, sont :

Type I :

C.	0,450 à 0,500
Si.	1,5 à 1,2

Type II :

C.	0,650 à 0,700
Si.	0,900 à 0,800 .

quelquefois la teneur en carbone s'abaisse à 0,300, le silicium alors s'élève à 2,5 0/0.

Le type I donne brut de forge :

R	75 à 85
E	46 à 51
A 0/0	14 à 18

Trempé à 900°, il donne :

R	150
E	150
A 0/0	2 à 0

Trempé à l'eau et revenu au bois étincelant :

R	120 à 135
E	100 à 120
A 0/0	12 à 5

A l'essai au choc, cet acier trempé et revenu donne de 3 à 7 kilogrammètres, chiffre extrêmement élevé pour un acier à aussi haute charge de rupture.

D'ailleurs, la propriété caractéristique d'un acier au silicium pour ressorts est justement de présenter, après trempe et recuit convenables, une résistance au choc remarquable dans le sens du laminage, bien que la limite élastique soit très élevée. Dans le sens perpendiculaire au laminage, la résistance au choc est presque nulle.

Quelques fabricants d'aciers à outils mettent d'importantes quantités de silicium dans leurs produits.

De plus, les aciers au silicium semblent présenter de grands avantages au point de vue constructions électriques. En effet, les tôles au silicium ne présentent presque pas le phénomène connu sous le nom de *vieillissement*.

Comme acier ayant une hystérésis aussi faible et une perméabilité aussi grande que possible, M. Hadfield recommande la composition suivante qu'il a fait breveter :

C	0,07
Si	2,75
Mn	0,08
S	0,03
Ph	0,03

Un échantillon pour tôles de dynamo nous a donné :

C	0,110
Si	3,85

Enfin, on essaie, à l'heure actuelle, un acier de construction à faible teneur en carbone (0,200 à 0,250 0/0) et renfermant 1 0/0 Si; il offre une limite élastique relativement élevée.

Il faut encore rappeler le rôle important que joue le silicium en sidérurgie, où il est employé pour éviter les soufflures.

ACIERS AU TITANE

Étude théorique. — On a très peu de données sur les aciers au titane.

Tous les aciers au titane que nous avons étudiés donnent les mêmes résultats que les aciers au carbone (Phot. 105 et 106, Pl. XXVII); il ne semble même pas y avoir trace d'azoture de titane. Nous avons examiné aussi le ferro-titane qui nous avait servi dans la fabrication. On y remarque des traînées jaunes qui, elles, doivent provenir de l'azoture et quelques points brillants qui doivent être un composé défini.

Étude industrielle. — Fabrication. — On a beaucoup parlé des aciers au titane; certains en ont même vanté les qualités sans cependant les préciser.

Il nous a paru très intéressant d'étudier systématiquement ces aciers. Ils ont été préparés avec des ferro-titanes obtenus au four électrique.

Mais on ne peut pas dépasser, dans la fabrication de ces aciers, une teneur de 10 à 15 0/0, les fours ordinaires à creusets ne permettant pas d'obtenir la température voulue pour fondre de tels alliages.

Propriétés mécaniques. — M. Hadfield, à propos des aciers au titane, dit que ce corps paraît jouer le même rôle que l'aluminium en absorbant les gaz; mais son emploi ne semble pas avantageux; car, lorsque la teneur dépasse 3 0/0, les qualités physiques du métal sont sensiblement altérées. En petite quantité, il paraît avoir pour effet d'élever la limite élastique.

Nous citerons quelques exemples de déterminations mécaniques faites sur les aciers au titane.

CARBONE	TITANE	R	E	A pour 100	Σ	CHOC	DURETÉ
0,122	0,41	40,7	33,9	20	684	25	99
0,137	1,40	48,2	36,1	19	62,1	25	101
0,135	2,57	45,2	34,6	17,5	68,4	29	90
0,695	0,64	94,1	52,6	9	28,4	3	207
0,624	1,72	87,7	53,3	10	36,4	3	212
0,611	2,57	90,4	58,8	10,5	34,7	3	212
0,635	4,63	89,8	57,8	9,5	34,2	4	212
0,650	8,71	117,5	62,5	8,5	29,7	5	248

On voit que le titane n'augmente que peu la charge de rupture. D'autre part, les résistances au choc et à la dureté ne sont pas modifiées.

Utilisations. — D'après les recherches que nous venons de résumer, les aciers au titane ne présentent aucun intérêt industriel. Ceci ne détruit pas la possibilité de l'emploi du titane comme épurateur.

ACIERS A L'ALUMINIUM

Étude théorique. — Métallographie (Album, Pl. XXV et XXVI). — Nous donnerons les principaux résultats de nos recherches.

Toutes les attaques ont eu lieu à l'acide picrique, à moins d'indications contraires.

L'acier à 0,5 0/0 d'aluminium est formé de perlite et de ferrite ; mais cette perlite présente un caractère un peu spécial; elle est beaucoup moins déliée que dans les aciers au carbone ordinaire (Phot. 97, Pl. XXV). Ce caractère de la perlite s'accentue nettement avec la dose d'aluminium. Dans l'acier à 3 0/0, la perlite ne forme plus que des amas noirs n'ayant plus l'aspect lamellaire sous les plus forts grossissements (Phot. 98, Pl. XXV). Ce phénomène se retrouve plus nettement encore dans l'acier à 5 0/0 d'aluminium.

A 7 0/0, on se trouve en présence d'un filet qui apparaît en noir par l'acide picrique et forme le contour des polyèdres. C'est de la perlite très compacte.

Un point important à retenir est le suivant :

Cette perlite spéciale apparaît par polissage en bas-relief, et cela d'autant mieux que la teneur en aluminium est plus élevée et que, partant, elle est plus compacte; de plus, la coloration qu'elle prend dans l'attaque au picrate de soude, laquelle est grise pour les faibles teneurs en aluminium, devient noire pour les teneurs élevées, comme si l'on était en présence de cémentite.

En tous les cas, il ne saurait être question ici de graphite, puisque le polissage ne fait apparaître le constituant qu'en blanc et très faiblement.

A 15 0/0, on se trouve en présence d'une microstructure absolument nouvelle : l'attaque à l'acide picrique ne donne rien qui soit net; l'eau régale diluée donne des polyèdres plus ou moins grossiers (l'acier ne se lamine pas), dans lesquels on distingue quelques points blancs. Nous n'avons pas vu de graphite dans cet acier. L'attaque au picrate de soude en solution sodique fait apparaître tous les points blancs en noir.

Nous sommes en présence de cémentite.

La structure particulière que nous avons retrouvée pour les aciers perlitiques de la première série, nous allons la rencontrer à nouveau dans les aciers à haute teneur en carbone.

L'acier de cette série à 0,45 0/0 d'aluminium présente une perlite assez nette.

L'acier à 1 0/0 d'aluminium présente une perlite beaucoup plus compacte.

Dans l'acier à 1,094 0/0 d'aluminium, il semble que les zones blanches soient en quantités supérieures à celles d'un acier ordinaire à 0,796 0/0 de carbone.

Il faut même noter que cet acier contient plus de carbone (0,796 0/0) que le premier (0,736 0/0) et, malgré cela, les zones blanches de ferrite sont moins nombreuses dans ce dernier. Ceci est encore beaucoup plus net dans l'acier à 2,9 0/0 d'aluminium, qui renferme 0,691 0/0 de carbone. Si l'on rapprochait la microstructure de cet acier de la gamme des aciers au carbone, on conclurait à une teneur en carbone d'environ 0,500. Mais ce fait semble trouver une explication logique dans la compacité de la perlite.

A 7 0/0 d'aluminium, la ferrite apparaît en grains blancs, sur un fond noir, qui doit être de la perlite. L'attaque au picrate de soude en solution sodique donne le résultat normal.

A 10 0/0 d'aluminium, on trouve une texture toute spéciale ; l'attaque à l'acide picrique précise de petits grains blancs, qui apparaissent déjà après polissage et montrent de petits amas noirs, très peu nombreux d'ailleurs, de perlite. L'attaque au picrate de soude en solution sodique colore tous

les petits grains en noir, tandis que les amas de perlite apparaissent en gris pâle. Nous nous trouvons en présence de perlite et de cémentite.

L'acier à 15 0/0 d'aluminium, qui ne laissera rien voir qui soit net dans l'attaque à l'acide picrique, montre, après action de l'eau régale diluée, des zones très blanches (Phot. 100, Pl. XXV), lesquelles, attaquées par le picrate de soude, apparaissent en noir foncé : c'est de la cémentite.

Nous avons observé d'autres aciers à l'aluminium ; nous citerons, notamment, un acier à 0,247 0/0 de carbone et 15,9 0/0 d'aluminium.

Cet acier donne un aspect assez semblable à celui que nous venons de définir.

Un autre acier à 0,890 0/0 de carbone et 15,2 0/0 d'aluminium a donné des résultats absolument anormaux. L'attaque à l'acide picrique donne généralement un liseré blanc, avec de la perlite compacte et, de plus, quelques aiguilles assez fines et très blanches ; l'attaque au picrate de soude colore en gris la cémentite et laisse en blanc l'aiguille et le liseré. On devrait conclure, en laissant de côté la question du constituant aciculaire, à de la ferrite entourée de perlite. Mais il y a, au centre de la barre, une région toute particulière et fort intéressante. Après polissage, on y distingue de très nombreuses aiguilles semblables à celles déjà signalées sur les bords de l'acier, mais beaucoup plus développées : l'attaque à l'acide picrique ne colore ni les aiguilles ni la partie environnante. Si on vient à attaquer au picrate de soude en solution sodique, tout le fond se colore en noir foncé, les aiguilles restant très blanches.

Cet échantillon hétérogène est fort curieux ; il semble que la première région soit formée de perlite et de ferrite, laquelle ne devrait pas exister dans un acier à 0,890 0/0 de carbone et que la seconde comprenne de la cémentite et un nouveau corps, qui peut être une combinaison fer-aluminium et qui, d'ailleurs, apparaît en petites quantités dans la première région.

En faisant subir un recuit à 900° à cet acier, on ne trouve plus que de la perlite et de la cémentite.

En résumé, l'on voit que l'aluminium entre en solution

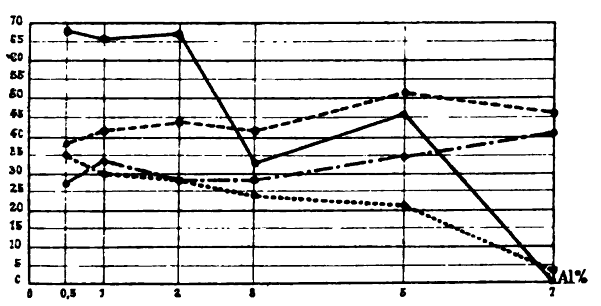


FIG. 135. — Essais à la traction. — Aciers à 0,150 0/0 C.

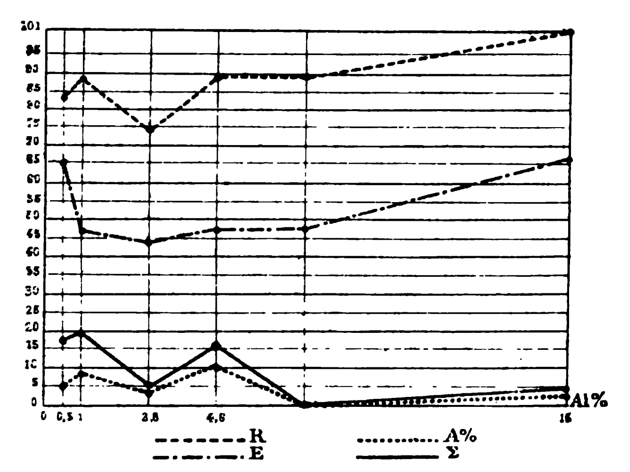


FIG. 136. — Essais à la traction. — Aciers à 0,800 C.

FIG. 135 et 136. — Aciers à l'aluminium (normaux).

dans le fer, que cette solution empêche la perlite de se développer, la force à prendre une forme granulaire et qu'enfin la perlite ne peut plus se former quand la teneur en aluminium est assez élevée, on a alors de la cémentite. Il ne se forme pas de graphite, comme on aurait pu le croire,

étant donné que l'aluminium précipite le carbone dans les fontes.

Étude industrielle. — PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES. — Les résultats sont résumés dans les graphiques des figures 135 à 138.

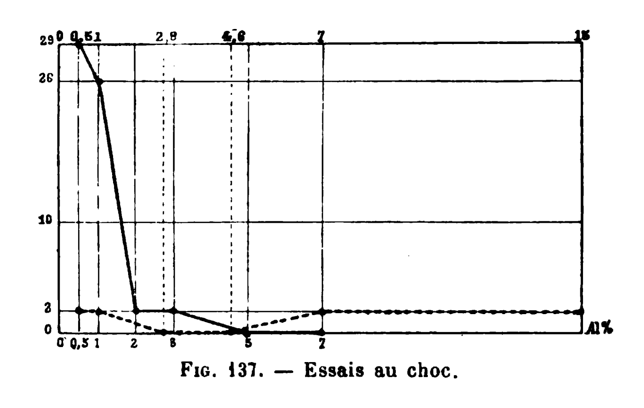


FIG. 137. — Essais au choc.

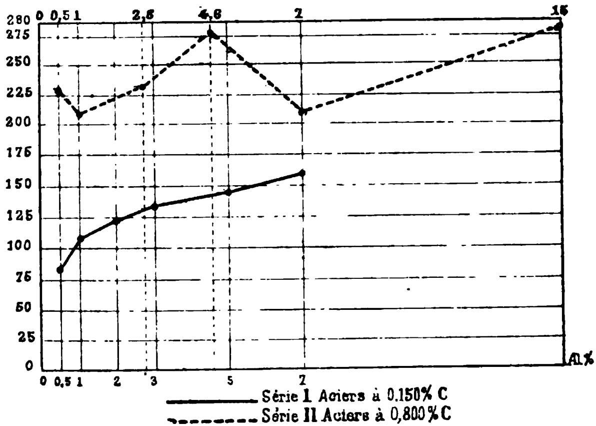


FIG. 138. — Essais à la dureté.

FIG. 137 et 138. — Aciers à l'aluminium normaux.

Ils démontrent que l'aluminium a peu d'influence sur les propriétés mécaniques des aciers, tant qu'il ne dépasse pas 3 0/0. En effet, les variations que l'on rencontre dans les résultats sont dues aux variations de lateneur en carbone. A 3 0/0 d'alu-

minium, il y a une diminution sensible dans les allongements et la striction. A 5 0/0, on note une légère augmentation dans la charge de rupture, et les allongements continuent à baisser; à 7 0/0, ils sont très fragiles, étant donné le bas pourcentage en carbone de cet acier.

Donc l'aluminium ne semble pas avoir d'influence sur la charge de rupture et la limite élastique; mais il y a une diminution très nette des allongements et strictions qui coïncide avec le moment où la perlite devient granulaire. Les aciers à basse teneur en aluminium possèdent de très jolies cassures. Mais, de 5 à 7 0/0 d'aluminium, on note de très gros grains.

On retrouve sur les aciers à 0,800 C la même influence de l'aluminium que dans la première série.

L'action est d'autant plus sensible que la teneur en carbone est moins élevée. Ce point semble nettement indiqué dans le fait de la diminution des allongements et strictions dans les aciers à 1,09 et 2,89 0/0 d'aluminium, tandis que l'acier suivant, qui renferme plus de carbone et 4,6 0/0 d'aluminium, possède des allongements et strictions plus élevés.

Quant à l'acier à 15 0/0 d'aluminium, qui présente une microstructure spéciale, il possède une charge de rupture élevée.

Utilisations. — Les aciers à l'aluminium n'offrent aucune caractéristique qui puisse en indiquer l'utilisation. Il faut toutefois ajouter qu'il semble être bien démontré que l'addition d'aluminium améliore considérablement les tôles pour dynamos, au point de vue hystérésis.

ACIERS AU COBALT

Étude théorique. — Métallographie. — Étant donné la similitude si étroite qui existe entre le nickel et le cobalt, on pouvait penser que ces deux métaux agiraient de même façon sur les propriétés du fer.

Il n'en est rien, du moins jusqu'à 30 0/0 de cobalt, même lorsque l'acier renferme 0,800 0/0 de carbone.

Tous les aciers au cobalt que nous avons étudiés sont perlitiques.

Ceci semblait d'ailleurs ressortir, du moins pour les aciers ne contenant que 0,200 0/0 de carbone, des importantes recherches de M. Dumas.

Étude industrielle. — Propriétés. — M. Dumas, dans son étude sur les aciers au nickel, a donné, sur quelques aciers au cobalt, des résultats fort intéressants qui se trouvent résumés dans le tableau suivant :

C	Co	E	R	A 0/0	Σ
0,250	5,12	33,5	46,7	32	68
0,267	10,80	44,1	60,6	27,5	53
0,287	15,40	49,7	66,7	25,5	55
0,160	19,76	59,8	73,8	18,5	42
0,183	25,16	56,3	74,2	18,5	39
0,117	29,24	54,9	76,8	18	34

On voit qu'il y a un relèvement lent de la charge de rupture et de la limite élastique et une diminution également lente des allongements et des strictions.

Nous retrouvons d'ailleurs ces faits dans les résultats que voici ; ils ont été donnés par M. Hadfield :

C	Co	E	R	A 0/0	Σ
0,16	0,53	42,5	59,7	29	43
0,25	1,80	39,3	64,5	19	24
0,38	2,50	59,7	82	15	15
0,55	4,46	58	89,5	15	17
0,52	6,91	?	86,5	14	13

Il n'y a aucun changement brusque dans les propriétés de ces aciers.

Voici, de plus, les résultats que nous avons obtenus sur des aciers à 0,800 de carbone.

C	Co	R	E	A 0/0	Σ	CHOC	DURETE
0,886	4,45	121,8	46,6	6	10,6	3	248
0,740	6,72	102.3	51,1	7	14,6	4	241
0,813	9,76	122,6	44,0	5	6,8	3	248
0,750	29,30	118,5	50,5	6	11,5	3	241

On voit bien que le cobalt a une certaine influence sur les propriétés mécaniques, mais cela sans aucun changement brusque.

Utilisations. — D'après les résultats que nous venons d'exposer, on voit que les aciers au cobalt ne présentent absolument aucun intérêt industriel.

ACIERS A L'ÉTAIN

Étude théorique. — Métallographie (Album, Pl. XXVII). — L'étain se rapproche beaucoup du silicium et du titane. Toutefois il ne joue pas le même rôle que le silicium dans les aciers; il ne précipite pas le carbone à l'état de graphite.

Il entre tout d'abord en solution dans le fer; puis aux environs de 5 0/0, il semble se séparer un composé défini, un stannure de fer, que nous cherchons actuellement à isoler. Quant au carbure, il reste toujours à l'état de perlite, du moins tant que le pourcentage ne dépasse pas 10 0/0 (Phot. 107 et 108, Pl. XXVII).

Étude industrielle. — Propriétés. — Les aciers renfermant 1,5 0/0 d'étain sont extrêmement difficiles à forger. A partir

de 2 0/0, on ne peut plus les travailler. Ils sont d'une fragilité extrême ; une barre d'un acier à 0,800 0/0 de carbone et 2 0/0 d'étain s'est brisée en mille morceaux dans le transport d'Imphy à Paris.

Il suffit de laisser tomber ces barres de 1 mètre sur des pavés pour les réduire presque en poussière ; à une teneur suffisamment élevée (5 0/0 environ), ces aciers deviennent extrêmement durs.

ACIERS AU BORE

Moissan et Charpy (*Comptes Rendus*, t. CXX, p. 130, 1895) ont fait quelques essais sur ces aciers. Ils ont montré que le bore augmente la résistance et diminue la faculté de tremper. En quantité assez importante le bore précipiterait le carbone, comme le fait le silicium.

ACIERS AU CUIVRE

Nous étudions au chapitre suivant les alliages fer-cuivre et les alliages fer-cuivre-carbone.

COMPARAISON ENTRE LES DIFFÉRENTS ACIERS TERNAIRES

Nous voudrions, dans ce dernier chapitre, résumer nos recherches en établissant des comparaisons entre les différents aciers.

Nous donnons tout d'abord des diagrammes théoriques montrant l'influence des différents éléments (*fig.* 139 à 142).

1° Essai de classification des aciers spéciaux ternaires (Album, Pl. XXIX et XXX). — Il nous semble que, d'après nos recherches, les aciers spéciaux peuvent être classés comme suit :

Première classe. — Le métal incorporé abaisse les points de transformation du fer. On a alors trois groupes :

Aciers perlitiques;

Aciers martensitiques ;

Aciers à fer α.

C'est le cas du nickel et du manganèse.

Deuxième classe. — Le métal incorporé abaisse les points de transformation du fer, et, de plus, il est susceptible de donner naissance à un carbure double[1] lorsqu'il se trouve en assez grande quantité.

On a encore trois groupes :

Aciers perlitiques;

Aciers martensitiques;

Aciers à carbure double.

C'est le cas du chrome.

Troisième classe. — Le métal incorporé est susceptible de donner naissance à un carbure.

On a alors deux groupes :

Aciers perlitiques;

Aciers à carbure double.

C'est le cas du tungstène, du molybdène et du vanadium.

Quatrième classe. — Le produit incorporé précipite le carbone à l'état de graphite.

On a deux groupes :

Aciers à carbure combiné;

Aciers à graphite.

C'est le cas du silicium.

Cinquième classe. — Le métal incorporé se dissout dans le fer.

Tous les aciers sont perlitiques.

C'est le cas (du moins dans les limites où nous les avons étudiés) des aciers au cobalt, au titane et à l'étain.

1. Nous ne comprenons pas, dans cette catégorie, les métaux qui, comme le manganèse, peuvent se substituer en partie au fer de la cémentite qui entre dans la perlite. De plus, il ne s'agit ici que d'aciers hypoeutectoïdes.

2° **Renseignements donnés par la micrographie au point de vue des propriétés mécaniques.** — On peut tirer un grand parti de l'étude micrographique d'un acier spécial.

Nous tâcherons de le prouver en quelques mots.

1° Si l'acier est perlitique, on ne pourra obtenir que des renseignements partiels; car ses propriétés mécaniques dépendent de l'élément qui peut être soit en dissolution dans le fer, soit dans la perlite (exemple : acier à l'étain perlitique et impos-

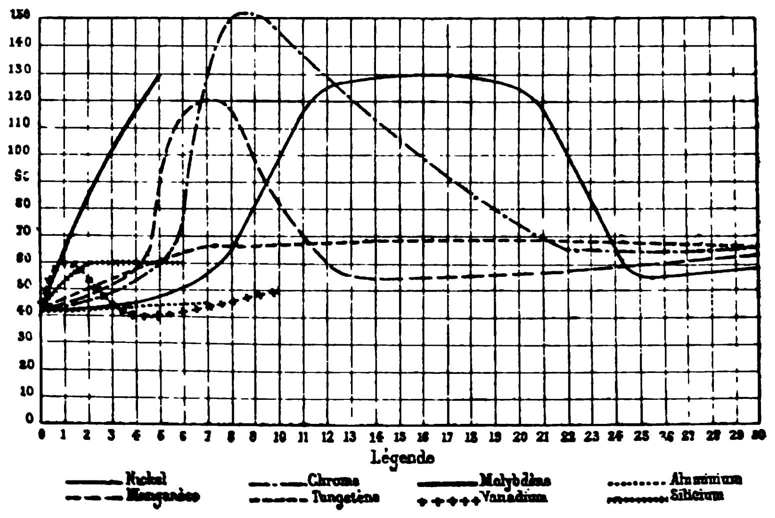


Fig. 139. — Influence des différents éléments sur la charge de rupture des aciers à 0,200 C.

sible à utiliser). Il faudra donc faire des essais mécaniques pour connaître la qualité d'un acier;

2° Si l'acier est martensitique, on devra conclure de suite que :

α) Il est à haute charge de rupture, haute limite élastique, faibles allongements, basses strictions;

β) Il est plus ou moins fragile;

γ) Il est dur et difficile à travailler;

3° Si l'acier est polyédrique, on peut déduire de sa microstructure que :

α) Il a une limite élastique plutôt basse, de très beaux allongements;

β) Il est extrêmement résistant au choc;

γ) Il peut être plus ou moins dur suivant les produits en solution dans le fer γ;

4° Si l'acier accuse, à la structure, un carbure, on peut distinguer :

α) Un acier au chrome : grains très ronds;

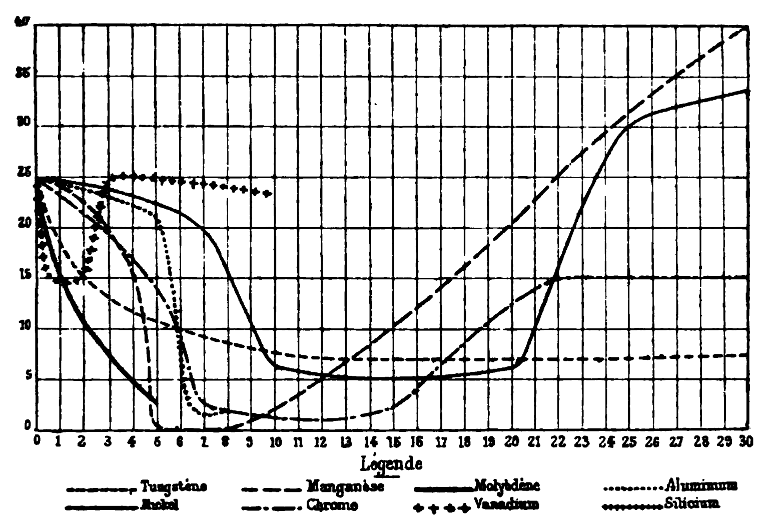


Fig. 141. — Influence des différents éléments sur les allongements 0/0 des aciers à 0,200 C.

β) Un acier au tungstène ou au molybdène : filaments fins;

γ) Un acier au vanadium : grains volumineux et généralement triangulaires.

En se reportant aux propriétés mécaniques indiquées pour ces aciers, on saura quelles conclusions prendre[1];

5° Si l'acier renferme du graphite, on peut déclarer qu'il est extrêmement fragile, que ses allongements et ses strictions sont nuls;

1. Cette distinction des aciers à carbure peut, *a priori*, paraître très subtile, étant donné que le carbure est produit par ségrégation; sa forme peut donc dépendre des conditions de refroidissement, etc. Cependant nous avons *toujours*, dans les différents cas, obtenu les formes que nous indiquons.

3° Utilisation des différents aciers ternaires. — 1° Parmi

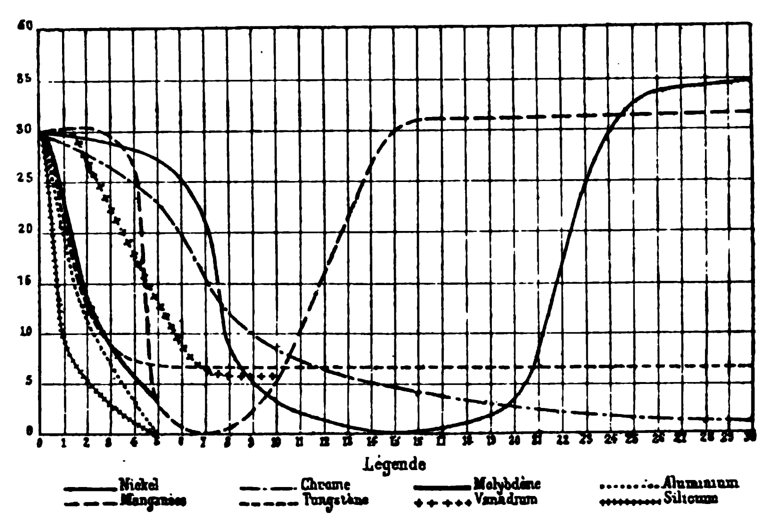


Fig. 141. — Influence des differents éléments sur la résistance au choc des aciers à 0,200 C.

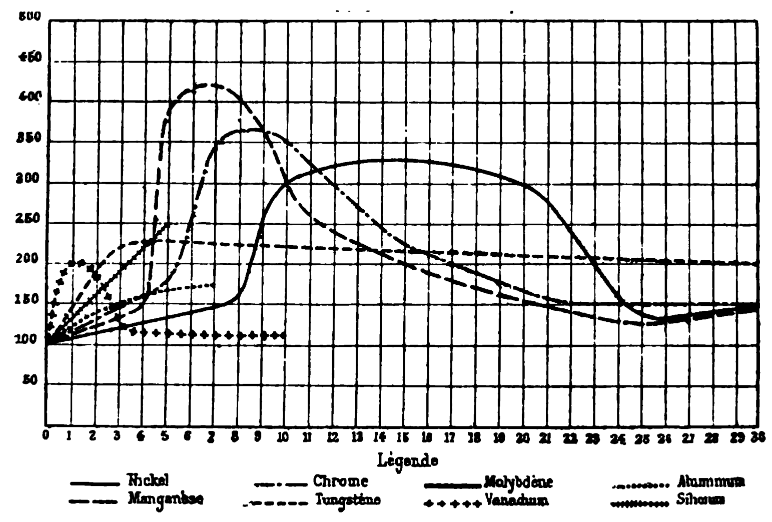


Fig. 142. — Influence des différents éléments sur la dureté des aciers à 0,200 C.

les aciers perlitiques, un certain nombre peuvent et doivent être

employés à la place des aciers au carbone. C'est le cas surtout des aciers au nickel, ce doit être jusqu'à un certain point celui des aciers au manganèse.

2° Quant aux aciers martensitiques, peu doivent être utilisés dans la construction; ils sont, en effet, assez fragiles et très difficiles à travailler. Mais certains peuvent être utilisés comme aciers à outils ou pour des emplois particuliers;

3° Les aciers polyédriques seraient assurés d'un brillant avenir industriel, si leur prix de revient n'était pas si élevé. De par ce fait, leur utilisation ne peut avoir lieu que dans des cas spéciaux. Encore faut-il tenir compte de leur basse limite élastique;

4° Parmi les aciers à carbure double, seuls les aciers au tungstène et au molybdène semblent avoir d'importants débouchés par la propriété qu'ils possèdent d'être très durs après trempe; leur emploi comme acier à outils s'est d'ailleurs généralisé complètement;

5° Enfin les aciers à graphite ne peuvent trouver aucun débouché.

ACIERS QUATERNAIRES

Les principaux aciers quaternaires sont :

1° Les aciers nickel-chrome;

2° Les aciers chrome-tungstène;

3° Les aciers manganèse-silicium.

Ces trois sortes d'aciers sont très employées à l'heure actuelle dans l'industrie :

4° Les aciers nickel-manganèse ;

5° Les aciers nickel-silicium ;

6° Les aciers nickel-vanadium.

Bien que ces aciers ne soient pas encore très usités, ils présentent un grand intérêt scientifique, et nous dirons quelques mots des recherches que nous avons entreprises à ce sujet et qui sont loin d'être terminées.

ACIERS NICKEL-CHROME

Étude théorique. — POINTS DE TRANSFORMATION. — Des expériences faites par M. Guillaume, d'une part, et par M. Dumas, d'autre part, il résulte que le chrome agit comme le carbone sur les aciers irréversibles à moins de 25 0/0 de nickel, et abaisse beaucoup la température de transformation magnétique.

Il faut citer l'exemple d'un acier à 22 0/0 de nickel devenant magnétique au refroidissement aux environs de 100° et restant non magnétique à — 180° dans l'air liquide, quand il renferme 3 0/0 de chrome.

On a ainsi abaissé le point de transformation de plus de 250°.

Le chrome paraît, au contraire, élever les points de transformation des aciers réversibles contenant moins de 30 0/0 de nickel et les abaisser pour des aciers à teneur en nickel plus élevée.

MÉTALLOGRAPHIE. — Bien que nos études ne soient pas achevées, nous pouvons cependant donner déjà quelques résultats intéressants : les aciers nickel-chrome peuvent être divisés en cinq groupes, à savoir :

1° Aciers perlitiques;
2° Aciers martensitiques ;
3° Aciers martensitiques et à carbure double;
4° Aciers à fer γ;
5° Aciers à fer γ et carbure double.

Étude industrielle. — FABRICATION. — Les aciers nickel-chrome sont souvent préparés au four Martin.

On utilise, pour de petites quantités, le four à creusets.

Propriétés. — Ces propriétés ont fait l'objet de quelques recherches de la part de M. Dumas. Il en résulte que l'addition de chrome augmente la charge de rupture et la limite élastique, du moins lorsqu'il est en quantités suffisantes. A retenir notamment les résultats suivants sur aciers non trempés :

COMPOSITION			ESSAIS MÉCANIQUES			
C	Cr	Ni	R	E	A 0/0	Σ
0,27	5,50	15,48	79,7	50,8	32,5	40
0,29	9,05	15,50	124,2	74,7	2,0	»
0,30	5,28	24,20	76,2	65,5	22,5	47

Utilisations. — Les principaux emplois des aciers nickel-chrome sont :

1° La fabrication des plaques de blindage ;

2° La fabrication des projectiles de perforation ;

3° La fabrication des pièces de mécanique et notamment de pièces d'automobile, tels qu'engrenages, pignons, arbres, etc.

Les principaux types d'aciers au nickel-chrome qui ont été ou sont utilisés dans l'industrie sont :

1° Pour les plaques de blindage (avec leurs caractéristiques mécaniques :

COMPOSITION			ESSAIS MÉCANIQUES			
C	Ni	Cr	R	E	A 0/0	Σ
0,240	1,700	0,20	66	50	18	56
0,300	2,500	0,80	70	51	15	»
0,330	2,540	0,50	75	54,7	16,5	37
0,430	2,800	0,82	82,7	64,7	15	41

Tous ces aciers se ramènent au type :

C	0,250 à 0,450
Ni	2 à 2,5
Cr	0,2 à 0,8

2° Pour les projectiles de perforation, on utilise en Angleterre :

C	0,800
Ni	2
Cr	2

A l'arsenal de Trubia, on utilise :

C	0,55
Ni	2,6
Cr	0,65

Ces derniers aciers sont soumis à des trempes successives. La première a lieu à 740° par immersion complète dans un bain d'huile à environ 25°; la seconde a lieu à 780° et ne porte que sur la pointe, qui est refroidie par un jet d'eau arrivant simultanément à l'extérieur et à l'intérieur de l'ogive.

3° Pour la fabrication des pièces d'automobile :

A.	C	0,250 à 0,450
	Ni	2,50 à 2,75
	Cr	0,275 à 0,500

Cet acier, qui est de beaucoup le plus répandu, donne :

Brut de forge :

R	55 à 75
E	35 à 50
A 0/0	15 à 25

Trempé à l'huile et revenu, il donne :

R	80 à 110
E	60 à 100
A 0/0	8 à 12

Cet acier, qui est vendu par les usines sous des noms divers (NC3H de la Société de Commentry-Fourchambault; CN5 des usines Jacob Holtzer; CN4 des Forges et Aciéries de la Marine et d'Homécourt), présente, après trempe et revenu, les avantages de posséder une certaine dureté, et cela avec peu de fragilité, et, d'autre part, de posséder une limite élastique très élevée qui lui permet de supporter des efforts importants sans subir de déformation permanente.

Il permet d'éviter, pour certaines pièces, l'opération délicate de la cémentation. Cependant en de nombreux cas sa durté superficielle ne paraît pas suffisante.

Nous avons donné, dans le chapitre *I*, l'influence du revenu sur les propriétés de cet acier.

B.	C	0,250 à 0,450
	Ni	5 à 6
	Cr	0,5 à 1 0/0

Il donne, brut de forge :

R.........................	65 à 85
E.........................	55 à 75
A 0/0......................	25 à 20

Et trempé à l'eau *sans revenu* :

R.........................	80 à 125
E.........................	65 à 110
A 0/0......................	18 à 11

Il est employé pour les arbres, les manivelles, etc.

C. Les aciers à teneur moyenne en nickel, dont le type, créé aux aciéries d'Imphy, correspond à la composition :

C..........................	0,350
Ni.........................	12
Cr.........................	0,80

Un tel acier donne sur métal recuit :

R	130
E	85
A 0/0	10
Σ	56

Les aciéries Jacob Holtzer ont donné les renseignements suivants sur un acier nickel-chrome renfermant 10 à 12 0/0 de nickel :

Recuit :

R	80 à 85
E	70
A 0/0	15 à 12

Avec un traitement convenable, on peut avoir :

R	120 à 130
E	110
A 0/0	10 à 7

Cet acier est très difficile à travailler et a dû être abandonné dans la plupart de ses applications.

D. Les aciers à haute teneur en nickel, dont le type est l'alliage créé aux aciéries d'Imphy (Société de Commentry-Fourchambault).

Il correspond à peu près à la composition :

C	0,550 à 0,750
Ni	21 à 23
Cr	2,50

C'est un acier à fer γ, il donne :

R	70 à 90
E	40 à 55
A 0/0	35 à 50

Il offre une très grande résistance au choc (plus de 40 kilogrammètres), ainsi qu'à l'usure. Ceci est général, d'ailleurs,

pour tous les aciers à fer γ, qui se polissent admirablement.

Les aciéries J. Holtzer ont donné sur un métal chromé à 25 0/0 nickel les renseignements suivants :

R	65 à 90
E	28 à 30
A 0/0	50 à 80

Les principales applications de ces aciers sont :

Arbres d'automobiles, boulons d'entretoise de plaques de garde de locomotive, etc.

Il ne faut pas oublier que de tels aciers ont une limite élastique relativement basse.

L'artillerie les utilise cependant à l'état très écroui pour les ressorts.

ACIERS CHROME-TUNGSTÈNE : ACIERS A COUPE RAPIDE

Étude théorique (Album, Pl. XXVIII). — Les aciers chrome-tungstène ont donné lieu à la création d'aciers spéciaux à outils connus sous le nom d'aciers à *coupe rapide*, qui jouissent de la propriété de pouvoir travailler l'acier à une température relativement élevée (au rouge sombre) sans perdre les propriétés données par la trempe.

Nous esquisserons ici la théorie de ces aciers, telle qu'elle semble découler des travaux d'un certain nombre de savants.

Les observations de M. Osmond, d'une part, de M. Otto Böhler, d'autre part, ont montré les variations de position du point critique dans ces aciers :

1° On abaisse les points critiques au refroidissement, lorsqu'on élève la température du chauffage précédent ;

2° Si cet abaissement est assez important et si la température de chauffage a été supérieure à une température minimum, l'acier

reste dur. Suivant l'expression anglaise, il est *self-hardened.*

Dans une étude parue dans la *Revue de Métallurgie*, de juin 1904, M. Osmond donne la théorie des aciers rapides, que nous tenons à reproduire dans ses grandes lignes.

« L'effet de la présence des métaux alliés tels que le chrome ou le tungstène est de gêner, pendant le refroidissement, la ségrégation de la cémentite suffisamment pour que l'on puisse, *en première approximation dans une certaine mesure et entre certaines limites*, négliger les variations de la vitesse de refroidissement. C'est un fait d'expérience. Il en résulte que les points de transformation sont abaissés pendant le refroidissement, même assez lent, d'autant plus que la teneur à l'origine est plus élevée au-dessus de l'eutectoïde. Et, si l'abaissement est suffisant, les transformations restent plus ou moins incomplètes.

« La trempe, qui était, pour les aciers au carbone, un moyen indirect d'obtenir le même résultat, n'est plus ici nécessaire. La position des points critiques sur l'échelle des températures, c'est-à-dire le durcissement éventuel, ne dépendra plus que de la teneur en carbone dissous au début du refroidissement, comme elle dépend de la teneur en nickel et en manganèse, quand l'un de ces corps est substitué au carbone.

« La teneur en carbone dissous est, elle-même, fonction directement de la température de chauffage et indirectement de la composition chimique.

« Bref, des deux facteurs, teneur en carbone et vitesse de refroidissement, utilisés dans les aciers au carbone pour obtenir toute la gamme des constituants structuraux, nous avons éliminé le second, et le premier à lui seul nous permet d'obtenir le même résultat. Nous *pourrons* donc avoir, comme état final, en faisant varier par la température de chauffage la teneur en carbone dissous, l'un quelconque des membres de la série perlite, sorbite, troostite, martensite, austénite, sans parler des mélanges de ces constituants entre eux, avec la cémentite en

excès. Je dis « *nous pourrons avoir* », parce que, en raison de la composition chimique, les termes extrêmes, inférieurs ou supérieurs, peuvent manquer.

« L'hypothèse que la répartition homogène du carbone est instantanée pendant le chauffage au-dessus des points critiques, hypothèse admise *provisoirement* au paragraphe précédent *pour la commodité de la démonstration*, est, en réalité, complètement inexacte pour les aciers perlitiques. La dissolution pendant le chauffage est difficile, tout comme la ségrégation pendant le refroidissement : ce sont les deux faces d'une même propriété. De plus, dans ces aciers rapides, pour une cause que j'ignore, la cémentite est souvent sphérolitique et non perlitique, de sorte que les noyaux de cémentite sont relativement écartés les uns des autres et que la répartition du carbone en est très retardée. Pour ces deux raisons ou, tout au moins, pour la première qui est constante, si le chauffage n'est pas très lent, la répartition du carbone n'est généralement pas homogène ou ne le devient qu'au-dessus d'une température élevée. Au-dessous de cette température on aura des îlots à carburation maximum autour des noyaux de cémentite et un fond à carburation minimum dans l'intervalle, c'est-à-dire deux constituants inégalement carburés, en négligeant les transitions. Si le refroidissement commence dans ces conditions, chaque fraction se comportera comme si elle était seule et aura sa recalescence à une température fonction de la teneur en carbone. Le dédoublement fréquent de la recalescence est ainsi expliqué. Comme corollaire, quand ce dédoublement se produit, l'état final sera naturellement hétérogène et on aura un mélange de deux constituants au moins. J'ai obtenu expérimentalement, dans un échantillon donné, en élevant successivement la température de chauffage la série suivante :

1° Sorbite et cémentite (une recalescence) ;

2° Troostite et cémentite (une recalescence) ;

3° Troostite et martensite (deux recalescences) ;

4° Martensite et mélange de martensite et d'austénite (une recalescence enregistrée et la seconde, non douteuse, non en-

registrée, parce que le refroidissement n'a pas été suivi jusqu'au bout).

« L'influence du temps de chauffage, signalée par M. Otto Böhler, s'explique avec la même facilité : la diffusion du carbone se poursuit à température constante, comme elle le ferait plus rapidement grâce à une élévation plus grande et plus courte de température.

« En général, la recalescence est simple si le chauffage n'a pas dépassé une température T_1 peu supérieure à A*c* 3.2.1., parce que la diffusion de la cémentite indépendante est encore pratiquement négligeable; elle se dédouble après chauffage, entre T_1 et $T_2 > T_1$, et redevient simple au-dessus de T_2 quand la répartition du carbone est devenue homogène.

« Il peut arriver que la recalescence, simple après chauffage au-dessus de T_2, redevienne double après chauffage à une température encore supérieure T_3. C'est qu'on est arrivé dans la région de fusion partielle : l'acier s'est de nouveau scindé en deux constituants, l'un liquide, et l'autre solide, dont les teneurs en carbone sont inégales et qui sont restés distincts pendant le refroidissement.

« La présence du chrome, du tungstène, etc., abaisse la teneur eutectoïde.

« Les aciers rapides sont donc généralement hypereutectoïdes. Dans le cas contraire, on a, au refroidissement, un point A*r* 3,2 indépendant de A*r* 1. Le même fait peut se produire dans un acier hypereutectoïde, si la cémentite est sphérolitique.

« Dans tous les cas, les points séparés se réunissent ordinairement quand on élève la température de chauffage et qu'on obtient ainsi la diffusion complète du carbone.

« Sur l'élévation de la température de revenu dans les aciers rapides, je n'ai pas d'explication spéciale : le fait paraît être une conséquence de plus de la difficulté de ségrégation du carbure. Il est possible aussi que l'austénite se transforme d'abord en martensite au revenu, d'où un durcissement au lieu de l'adoucissement auquel on est habitué avec les aciers au carbone. Cette dernière idée m'a été suggérée par M. Henri

Le Chatelier, et elle est très plausible. J'ai constaté moi-même que, à un certain moment du revenu, l'austénite devenait plus dure que la martensite ; mais les mesures n'étaient que relatives.

« En résumé, il n'y aurait pas de théorie spéciale des aciers rapides.

« Pour rendre immédiatement applicable la théorie des aciers au carbone, il suffit de faire entrer en ligne de compte le fait que la ségrégation du carbure pendant le refroidissement et la dissolution correspondante pendant le chauffage sont rendues difficiles par la présence du chrome, du tungstène et autres corps assimilables. Dès lors on peut obtenir sans la trempe toute la série des équilibres interrompus qui caractérisent la trempe dans les aciers au carbone, y compris, avec l'austénite, l'absence de toute transformation. »

Étude industrielle. — Avantages de ces aciers. — Les aciers à coupe rapide ont fait leur apparition à l'Exposition Universelle de 1900. Ils étaient utilisés sur des machines-outils spéciales situées à l'Annexe de Vincennes.

Dans la conférence qu'il fit à la Société d'Encouragement pour l'Industrie nationale, le 27 avril 1904[1], M. H. Le Chatelier rappelle que l'on voyait s'enrouler d'énormes copeaux bleuissant, au moment où ils s'arrachaient de la masse métallique, par l'élévation de leur température. Aucun arrosage n'était employé pour le refroidissement : c'était la négation de tout ce que l'on savait sur le travail normal des outils. En général, le plus léger échauffement suffit pour les détremper et leur enlever toute dureté, les rendant ainsi incapables de faire aucun travail utile.

Le traitement auquel ces nouveaux aciers étaient soumis pour les durcir n'était pas moins extraordinaire. Avant trempe, on les chauffait jusqu'au voisinage de leur point de fusion, ce qui eût suffi pour brûler des aciers au carbone ordinaire et les

1. *Revue de Métallurgie*, juin 1904.

rendre impropres à tout usage. Enfin ces mêmes aciers, au lieu d'être trempés à l'eau, l'étaient dans un bain de plomb à 600°, température plus que suffisante pour adoucir amplement les aciers employés jusque-là.

Ces nouveaux aciers à outils renfermaient quelques centièmes de chrome, de tungstène, parfois même de molybdène et des quantités de carbone variant de 1 à 2 0/0. Ils avaient été découverts par deux ingénieurs américains des usines de Bethlehem, MM. White et Taylor.

Un progrès avait déjà été fait avec l'acier Mushet au tungstène; ces aciers permettaient d'atteindre la température de 300°, sans qu'il y eût à craindre de voir l'acier se détremper.

Avec les nouveaux aciers chrome-tungstène, on peut aller jusqu'à 600°.

Voici, d'ailleurs, les résultats d'expériences faites à Manchester et reproduits par M. H. Le Chatelier.

Ces expériences ont porté sur différents aciers rapides et sur un acier à outils ordinaire au carbone destiné à servir de terme de comparaison. Les aciers travaillés avec ces outils correspondaient aux trois teneurs en carbone de 0,2, 0,3 et 0,5.

Les chiffres du tableau suivant sont les moyennes des résultats obtenus avec les meilleurs aciers à outils ayant servi aux expériences, avec ceux qui ont été capables de faire un travail continu de vingt minutes sans altération. Les qualités de tous ces aciers était d'ailleurs très voisine, et c'est à des causes accidentelles qu'il semble falloir attribuer l'insuccès des uns ou des autres dans telle ou telle expérience.

ACIER

	DOUX				DEMI-DUR				DUR			
Surface de coupe en millimètres carrés	2,7	7,7	15,4	30,7	2,7	7,7	15,4	30,7	2,7	7,7	15,4	30,7
Vitesse en mètres par minute	46	34	23	17	33	24	15	12	16	12	11	65
Poids enlevé en kilogrammes par minute	0,8	1,9	2,4	3,3	0,46	1,2	1,8	2,5	0,3	0,8	1,05	1,4

FONTE

	DOUCE				DEMI-DURE				DURE			
Surface de coupe en millimètres carrés	2,7	7,7	15,4	30,7	2,7	7,7	15,4	30,7	2,7	7,7	15,4	3,07
Vitesse en mètres par minute	33	30	22	17	18	15	10	8	12	10	7	7
Poids enlevé en kilogrammes par minute	0,56	1,4	1,4	3,4	0,3	0,8	1	1,5	0,2	0,2	1,2	1,45

Avec l'acier au carbone ordinaire, il ne fut pas possible sur l'acier doux de dépasser 9 mètres par minute, au lieu de 46 mètres obtenus avec les aciers rapides. On ne peut enlever plus de $0^{kg},300$ par minute, tandis qu'avec les aciers rapides on peut aller jusqu'à 3 kilogrammes de métal dans le même temps, soit dix fois plus, et cependant on est généralement d'accord pour reconnaître que, dans ces expériences de Manchester, on n'est pas arrivé à tirer des aciers rapides tout le parti possible. On obtient en effet facilement avec eux des vitesses de coupe de 60 mètres.

Pour enlever un poids considérable de métal, l'effort exercé sur l'outil est naturellement augmenté; il varie d'une façon sensiblement proportionnelle à la surface de coupe et croît avec la limite élastique du métal travaillé. Dans les expériences de Manchester, l'effort supporté par l'outil pour 1 millimètre de surface de coupe a été le suivant sur les différents aciers travaillés :

ACIER			FONTE		
DOUX	DEMI-DUR	DUR	DOUCE	DEMI-DOUCE	DOUCE
kilogr. 181	kilogr. 170	kilogr. 235	kilogr. 80	kilogr. 132	kilogr. 130

Le tableau suivant résume les résultats des mesures qui ont servi à calculer les chiffres moyens ci-dessus et donne en même temps le travail net dépensé pour actionner le tour, c'est-à-dire le travail observé diminué du travail dépensé dans la marche à vide.

Celle-ci était considérable en raison du mécanisme assez compliqué employé pour la transmission de la force motrice.

ACIER

	DOUX				DEMI-DUR				DUR			
Surface de coupe en mil. carrés.	2,6	7,7	15,4	30,7	2,6	7,7	15,4	30,7	2,6	7,7	15,4	30,7
Vitesse en mètres.............	46	35	20	15	30	25	15	10	17	12	9	6
Travail effectif en chevaux......	3,5	8	10	14	3	5,5	9	11,5	2,5	4,5	6	9
Effort total en kilogrammes.....	370	1.100	2.500	4.500	410	1.100	2.400	4.600	550	1.800	3.200	7.000
Effort par mil. c. de coupe en kilog.	173	173	190	195	180	156	173	173	250	230	230	245

FONTE

	DOUCE				DEMI-DOUCE				DURE			
Surface de coupe en mil. carrés.	2,6	7,7	15,4	30,7	2,6	7,7	15,4	30,7	2,6	7,7	15,4	30,7
Vitesse en mètres.............	33	25	19	15	18	14	10	8	11	9	7	5
Travail effectif en chevaux......	1,7	2,7	5	7	1,5	2,5	4	6,5	1,5	1,7	2,5	3
Effort total en kilogrammes.....	200	450	1.100	1.700	350	800	1.500	3.200	440	750	1.600	2.500
Effort par mil. c. de coupe en kilog.	105	62	87	69	175	110	110	130	180	115	120	89

Bien entendu, pour tirer de ces nouveaux aciers tout le parti possible, il faut des machines-outils appropriées. La vitesse et la puissance des tours ordinaires sont tout à fait insuffisantes.

« Un fait, dit M. Le Chatelier, permettra de préciser l'importance des services rendus par ces aciers rapides. Les ateliers du « Canadian and Pacific Railway » étaient devenus insuffisants, et l'on avait décidé de les doubler en construisant un second bâtiment semblable au premier. Les plans étaient prêts, et l'on allait passer à l'exécution quand apparurent les aciers rapides. Ils furent essayés de suite, et l'augmentation de la production fut telle que la construction du nouvel atelier a été indéfiniment ajournée. »

Outre l'intérêt direct résultant de l'accroissement de production des machines-outils, l'emploi des aciers rapides a eu indirectement une autre conséquence non moins importante. Les machines-outils ne servent qu'à finir des pièces ébauchées au laminage ou à la forge. En général on s'attachait à pousser aussi loin que possible le travail d'ébauchage pour réduire le travail sur le tour qui était notablement plus onéreux. Aujourd'hui la situation est renversée et la diminution du prix de revient du travail de finissage conduit à se contenter d'un travail de préparation beaucoup plus sommaire et, par suite, bien plus économique.

Composition. — Au début, la teneur en carbone était au voisinage de 1 0/0; la somme des teneurs en tungstène et chrome était de 16 0/0.

Actuellement la teneur en carbone va de 0,300 (quelquefois même moins) à 0,700 0/0; celle de tungstène de 7 à 18 et même 22 et celle de chrome de 1,5 à 3; elle dépasse rarement ce chiffre. Cependant certaines marques en contiennent 8 0/0.

Parfois on trouve de 1 à 2 0/0 de molybdène.

M. Le Chatelier donne la composition moyenne suivante des aciers à coupe rapide:

C	0,5
Si	0,2
Mn	0,2
W	12
Cr	3
Mo	1
Fe	83
	99,90

Voici, d'ailleurs, un certain nombre d'analyses d'aciers rapides :

1° Analyses citées par M. H. Le Chatelier :

C	Si	Mn	W	Cr
0,71	0,20	0,30	12	3
0,43	0,22	0,17	15,5	4,5
0,45	0,16	0,02	13	1,6
0,45	0,60	0,18	9,5	2,05
0,60	0,40	0,30	13,5	8
0,20	0,25	0,18	7	2,1

Le molybdène n'a pas été dosé dans ces aciers.

D'autre part, voici les analyses des trois marques d'aciers à coupe rapide les plus répandues.

	I	II	III
C	0,60	0,79	0,72
W	9,92	18,28	13,55
Cr	2,83	2,90	5,25
P	0,01	»	»
S	0,01	»	0,005
Si	traces	traces	traces
Mn	traces	0,25	0,18

On sait que, à la trempe au plomb, on a substitué la trempe simple dans un courant d'air.

Voici, d'après M. Le Chatelier, de quelle façon varient certaines caractéristiques de ces aciers :

La dureté paraît diminuer avec la teneur en carbone ; mais

elle dépend dans une large mesure du traitement thermique, et l'on manque de données précises à ce sujet.

Les nouveaux aciers paraissent plus fragiles que les aciers au carbone, se cassent plus facilement sous les chocs, même quand on ne leur demande pas plus de travail qu'aux aciers ordinaires à outils, *a fortiori* si on veut leur faire développer tout leur travail utile.

La résistance au revenu, c'est-à-dire le non-adoucissement par chauffage après trempe est la qualité essentielle des aciers rapides. Les types actuels supportent au moins pendant un certain temps la température de 5 à 600°; mais ils sont adoucis complètement par un chauffage de une heure à 700°.

ACIERS MANGANÈSE-SILICIUM

Les aciers mangano-siliceux n'ont pas été très étudiés au point de vue théorique. Nos recherches à ce sujet ne sont pas assez avancées pour que nous puissions donner des résultats d'ensemble intéressants.

Actuellement les aciers mangano-siliceux à très faible teneur en ces deux éléments sont assez employés ; ils donnent notamment de bons résultats comme engrenages et comme ressorts.

Leur composition moyenne est sensiblement la même que celle des aciers supérieurs à ressorts; avec peut-être un pourcentage de manganèse un peu plus élevé.

Les aciers mangano-siliceux donnent :

Bruts de forge :

R	80 environ
E	52
A 0/0	16

Trempés et revenus :

R	150
E	140
A 0/0	6

Ces renseignements ont été publiés par les Aciéries de la Marine.

Voici les renseignements qui ont été donnés sur un acier analogue par la Société Française de Constructions Mécaniques[1] :

On peut obtenir les trois qualités suivantes :

Trempe à 850-880° suivie d'un revenu à :

505°....	R = 130 kilogrammes.	Choc = 9 kilogrammes
595°....	R = 95 —	Choc = 10 —
710-760°	R = 75 —	Choc = 16 —

ACIERS NICKEL-MANGANÈSE

Étude théorique. — M. Dumas a étudié quelques aciers nickel-manganèse. Il a reconnu que le manganèse joue un rôle semblable à celui du nickel, mais à teneur égale il produit un abaissement un peu plus grand pour le point de transformation à l'échauffement et beaucoup plus grand pour le point de transformation au refroidissement. M. Hadfield a signalé que, tandis qu'un acier à 0,500 0/0 de carbone et 5 0/0 de manganèse est fragile, un acier renfermant 5 0/0 de manganèse et 14,5 0/0 de nickel avec 0,600 0/0 de carbone ne l'est plus du tout.

Il a donné :

	R	E	A 0/0	Σ
Métal laminé..................	86	43	45	38
Métal trempé à 1.100...........	80	28	75	47

Sous forme d'un fil étiré à 2 millimètres de diamètre, la ténacité s'est élevée à 190 kilogrammes. Essayé au mouton

1. *Revue de Métallurgie*, 1904, p. 643.

Frémont, cet acier a absorbé 36 kilogrammètres sans se briser.

Nous avons étudié un grand nombre d'aciers nickel-manganèse et, bien que nous ne puissions reproduire ici tous les détails de ces recherches, nous tenons à en donner les principaux résultats, qui sont d'ailleurs extrêmement simples.

Les aciers nickel-manganèse se subdivisent comme les aciers

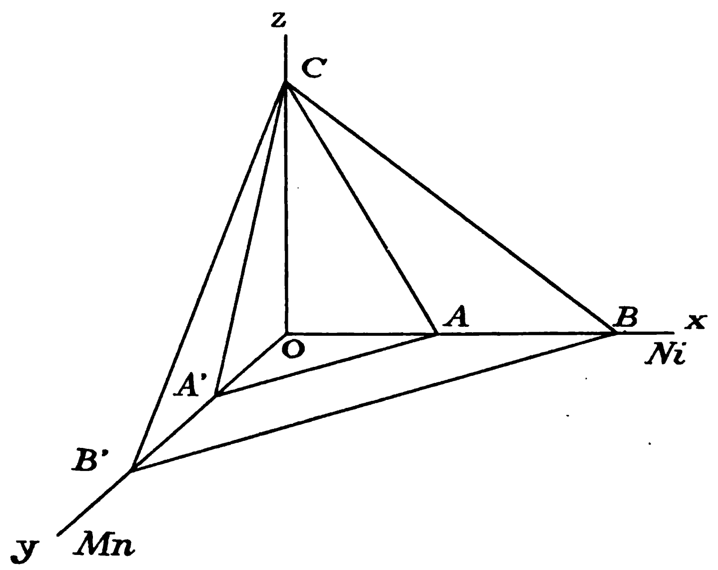


Fig. 143. — Diagramme des aciers nickel-manganèse.

au nickel, comme les aciers au manganèse, en trois groupes :

Premier groupe : Aciers perlitiques ;

Deuxième groupe : Aciers martensitiques ;

Troisième groupe : Aciers polyédriques.

Il est, d'ailleurs, bien entendu que le passage d'un groupe à l'autre ne se fait pas brusquement, qu'il existe des aciers qui renferment simultanément de la perlite et de la martensite ou bien de la martensite et du fer γ.

Le passage d'un groupe à l'autre dépend de la somme C + Ni + Mn.

Le diagramme de la figure 143, que nous avons vérifié sur un grand nombre d'échantillons, donne d'ailleurs la constitution

d'un acier en connaissant sa composition. Il a été établi de la façon suivante :

Prenons trois axes de coordonnées rectangulaires *ox*, *oy*, *oz*. Portons les teneurs en nickel sur l'axe des *x*, celle en manganèse sur l'axe des *y*, et celle en carbone sur l'axe des *z*.

Dans le plan *xoz*, portons le diagramme des aciers au nickel; le point C est défini par OC = 1,650; A par OA = 13; B par OB = 27.

Dans le plan *yoz*, portons le diagramme des aciers au manganèse : le point C est défini par OC = 1.650, A′ par OA′ = 6,8, B′ par OB′ = 13.

Joignons, dans le plan *xoy*, AA′ et BB′. — On obtient deux droites sensiblement parallèles.

1° Tous les aciers situés dans le trièdre CAOA′ sont perlitiques;

2° Tous les aciers situés entre les deux plans ACA′ et BCB′ sont martensitiques;

3° Tous les aciers situés en avant du plan BCB′ sont polyédriques.

Étude industrielle. — Propriétés. — Les propriétés mécaniques sont en absolue concordance avec les déterminations micrographiques. C'est dire que :

1° Les aciers du premier groupe ont une charge de rupture et une limite élastique d'autant plus fortes que la somme carbone + nickel + manganèse est plus élevée, mais ne s'écartant jamais beaucoup de la valeur qu'elles auraient dans un acier ordinaire à même teneur en carbone; ils ne sont ni fragiles, ni durs.

2° Les aciers du deuxième groupe possèdent une charge de rupture et une limite élastique très élevées; ils sont très fragiles et très durs;

3° Les aciers du troisième groupe ont une charge de rupture moyenne, une limite élastique très basse. Ils offrent une très grande résistance au choc; leurs chiffres de Brinell sont faibles; *ils sont cependant difficiles à travailler.*

Utilisations. — L'industrie ne fait pas encore d'aciers nickel-manganèse. Ils nous paraissent cependant offrir un grand intérêt, du moins les aciers perlitiques et les aciers à fer γ, le manganèse permettant de diminuer très sensiblement le prix de revient des aciers au nickel.

ACIERS CHROME-VANADIUM

Dans un mémoire d'une certaine importance, MM. Sankey et Smith (*Instit. of Mechanical Engineers*, 1904) étudient le traitement thermique de quelques aciers chrome-vanadium.

Leurs recherches ont porté notamment sur les deux aciers suivants :

1°	C	0,22
	Si	0,086
	Mn	0,290
	Cr	1,02
	Va	0,17
2°	C	0,44
	Si	0,173
	Mn	0,837
	Cr	1,044
	Va	0,188

Le premier a donné :

R	76,5
E	57
A 0/0	24
Σ	56,6

Le second était destiné à la fabrication des ressorts.

Les propriétés indiquées par les auteurs ne semblent pas présenter beaucoup plus d'intérêt que celles des aciers au vanadium. D'ailleurs, il est très probable que les deux éléments, chrome et vanadium, agissent dans le même sens.

Ces recherches paraissent donc d'un intérêt restreint pour l'industrie.

1. Dans la discussion qui a suivi les mémoires que nous avons présentés au meeting de l'Iron and Steel Institute (septembre 1905), on a affirmé que différents types d'aciers chrome-vanadium étaient déjà très employés en Angleterre, notamment dans la construction des automobiles.

AUTRES ACIERS

Avant de terminer ce qui a trait aux aciers spéciaux, nous devons dire un mot d'un alliage découvert par la Société de Commentry-Fourchambault dans ses aciéries d'Imphy et dont la composition est tenue secrète.

Cet acier, désigné par les lettres NY, donne, recuit :

R........................	50 à 55
E........................	40 à 45
A 0/0....................	30 à 25

Après trempe entre 750 et 800°, *sans revenu*, il donne :

R.....................	130 à 140
E.....................	120 à 125
A 0/0..................	10 à 8

On voit donc que cet acier, qui se travaille comme un acier demi-dur, donne des résultats surprenants après une simple trempe, *sans revenu*. Il est déjà fort utilisé pour la construction d'un grand nombre de pièces d'automobile (arbres, engrenages, etc...) et pour les plaques de blindage, les paraballes, etc.

Il a donné comme plaques paraballes des résultats très intéressants : le tir réglementaire au fusil Lebel sur plaque de 5 millimètres d'épaisseur se fait à 150 mètres, et il ne faut pas qu'il y ait de fissures laissant passer l'eau. Avec l'acier NY, à 50 mètres, on a satisfait à cette condition. Une plaque de 4 millimètres d'épaisseur du même acier a donné à 150 mètres de très bons résultats.

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE IV

ARTICLES GÉNÉRAUX

Abraham, *Annales des Mines*, XIV, 1898, p. 225.
Arnold, *Iron and Steel Metallurgist*, XLV, p. 107, 1894.

Babu, *les Aciers spéciaux* (Congrès de métallurgie de 1900).

Guillet, *Rapport au Congrès de Métallurgie de Liège*, 1905 ; — *les Aciers spéciaux*, 2 vol. 1904 et 1905, chez H. Dunod; — *Revue de Métallurgie*, mai 1905 ; — *Ingénieurs civils de France*, juillet 1904.

Hadfield, *Iron and Steel Metallurgist*, 1904.

Howe, *Iron and Steel and Other alloys*, 1903.

Von Juptner, *Eléments de sidérologie.*

Le Chatelier, *Revue de Métallurgie*, p. 574, novembre 1904.

Ledebur, *Manuel de la Métallurgie du Fer*, t. I, chap. VII, p. 322, Bérenger, 1903.

ACIERS AU NICKEL

Babu, *Résultats des essais sur les aciers au nickel* (*Ann. des Mines*, série 9, t. XV (1899), n° 428.

Boudouard, *Revue de Métallurgie*, 1904, p. 80 (*Thermo-électricité*).

Carnot et Goutal, *Contribution à l'étude des alliages* (*Étude chimique*).

Congrès des Méthodes d'Essais des matériaux de construction, Paris, 1900.

Dumas, *Recherches sur les aciers au nickel*, Vve Dunod (*Propriétés*) ; — *Comptes Rendus*, 3 juillet 1899 (*Points de transformation*) ; — *Revue générale des Sciences*, 1903 (*Théorie*).

Guillaume, *les Applications des Aciers au Nickel*, Gauthier-Villars, 1904; — *Revue générale des Sciences*, 1903 (*Théorie*); — Société d'Encouragement, mars 1898 (*Dilatations*).

Guillet, *Ingénieurs civils de France*, juillet 1903 (*Propriétés*); — Société d'Encouragement, p. 658, 1903 (*Micrographie*) ; — Société d'Encouragement, p. 214, II, 1903 (*Diagramme*) ; — *Comptes Rendus*, 26 janvier, 23 février, 17 août 1903.

Grenet, *Revue de Métallurgie*, p. 359, 1904 (*Traitement*).

Hadfield, *Alloys of iron and nickel* [*Proceedings of the Instit. of civil, Engin.*, t. CXXXVIII (1900)].

Hopkinson, Société royale de Londres, 2 décembre 1889 (*Magnétisme*); — *Id.*, janvier 1890 (*Id.*).

Moulan (Ph.), *Le Ferronickel* (*Revue univ. d. min.*, série 3, t. XXVII, p. 142, 1894).

Osmond, *Comptes Rendus*, 30 janvier 1889 (*Points de transformation*) ; — *Id.*, 3 juillet 1899 (*Id.*) ; — *Revue générale des Sciences*, 1903 (*Théorie*); — Société des Ingénieurs civils de Londres, 1899 (*Micrographie*) ; — *Revue générale des Sciences*, 1904 (*Théorie*).

Osmond et Cartaud, *Annales des Mines*, janvier 1900 (*Id.*).

Riley, *On alloys of nickel and steel* (*Journ. of the Iron and Steel inst.*, 1889, I, p. 45).

Rudeloff, *Festigkeit der Nickeleisenlegirungen* (*Verhandlungen des Ver. zur Beford. des Gewerb.*, 1896, p. 65).

Verwendung von Nickelstahl, *Stahl und Eisen*, 1899, p. 1020.

Vogel, *Eigenschaften des Nickelstahls* (*Zeits. der Ver. deuts. Ingen.*, 1895, p. 1353).

Zdanowitz, *Zur Metallurgie des Nickelstahls* (*Stahl und Eisen*, 1901, p. 753).

ACIERS AU MANGANÈSE

Carnot et Goutal, *Contribution à l'étude des Alliages*, Société d'Encouragement, p. 493 (*Étude chimique*); — *Ann. des Mines*, octobre 1900.

Dumas, *les Aciers au nickel*, Dunod, éditeur (*Points de transformation*).

Guillet, Société d'Encouragement, p. 421, octobre 1903 (*Micrographie et propriétés*); — *Revue de Métallurgie*, p. 1904 (*Id.*, *Id.*); *Comptes Rendus*, 21 septembre 1903; — Société des Ingénieurs civils de France, juillet 1903 (*Propriétés*).

Hadfield, *Journ. of the Society Chemic. Ind.*, XXIII, 1904 (Brevet); — *On Manganese steel* (*Journ. of the Iron and Steel Inst.*, 1888, II, p. 41).

Howe, *Manganstahl.* (*Stahl und Eisen*, 1891, p. 993.)

Le Chatelier (H.), Société d'Encouragement : *Contribution à l'étude des alliages*, p. 413 (*Résistance électrique*); — *Comptes Rendus*, t. CXIX, p. 272, 1894 (*Id.*).

Osmond, *Comptes Rendus*, 1897 (*Points de transformation*).

Osmond et Cartaud, *Annales des Mines*, janvier 1900 (*Micrographie*).

Wedding, *Der Einfluss des Mangans auf die Festigkeitseigenschaften des Eisens* (*Verandl. d. Ver. z Beford. d. Gewerb*, 1881, p. 509).

Weeks, *Hadfields Manganese steel* (*Trans. of the americ. Inst. of mining Engin.*, t. XIII, p. 233; t. XV, p. 465).

ACIERS AU CHROME

Boussaingault, *Sur la production, la constitution et les propriétés des aciers chromés* (*Ann. de Chimie et de Phys.*, série 5, t. XV, p. 91).

Brunstlein, *On chrome pig iron and steel* (*Journ. of the Iron and Steel Inst.*, 1886, II, p. 770); — *Revue de métallurgie*, 1905.

Busech, *Bemerkungen über Ferrochrom und Chromesthal* (*Stahl und Eisen*, 1889, p. 727).

Mme Curie, *Contribution à l'étude des Alliages*, Société d'Encouragement, p. 159 (*Magnétisme*).

Carnot et Goutal, *Contribution à l'étude des Alliages*, Société d'Encouragement, p. 493; — *Étude chimique*.

Guillet, *Revue de métallurgie*, p. 156, 1904 (*Micrographie et propriétés*); — *Comptes Rendus*, 16 août 1904; — *Ingénieurs civils de France*, juillet 1903 (*Propriétés*).

Hadfield, *Alloys of iron and chromium* (*Journ. of the Iron and Steel Inst.*, 1892, II, p. 49).

Osmond, *Iron and Steel Institute*, 1892, II (*Points de transformation e- micrographie*.

ACIERS AU TUNGSTÈNE

Bohler, *Ueber Wolfram und Rapidstahl*, Berlin, 1903 (*Points de transformation, dureté*).

Carnot et Goutal, *Contribution à l'étude des Alliages*, Société d'Encoura gement, p. 493 (*Étude chimique*).

Mme Curie, *Contribution à l'étude des Alliages*, Société d'Encouragement, p. 159 (*Magnétisme*).

Guillet, *Revue de Métallurgie*, p. 263, 1904 (*Micrographie et Propriétés*) ; — *Comptes Rendus*, 26 septembre 1904 ; —*Ingénieurs civils de France*, juillet 1903 (*Propriétés*).

Osmond, *Comm. des Méthodes d'Essais*, janvier 1892 (*Points de transformation, dureté*) ; — *Iron and Steel Institute*, 1903, II, p. 65 (*Id.*).

ACIERS AU MOLYBDÈNE

Carnot et Goutal, *Contribution à l'étude des alliages*, Société d'Encouragement (*Étude chimique*).

Mme Curie, Société d'Encouragement, *Contribution à l'étude des Alliages*, p. 159 (*Points de transformation*).

Guillet, *Revue de Métallurgie*, p. 390, 1904 (*Micrographie et propriétés*) ; — *Comptes Rendus*, 3 octobre 1904 ; — Société des Ingénieurs civils, juillet 1904 (*Propriétés*).

W. v. Lipin, *Einige Eigenschaften des Molybdänstahls* (*Stahl und Eisen*, 1897, p. 571).

ACIERS AU VANADIUM

Guillet, *Revue de Métallurgie* (*Micrographie et propriétés*) ; — *Comptes Rendus*, 20 juin, 8 août 1904 (*Id.*) ; — Société des Ingénieurs civils, juillet 1904 (*Constitution et Propriétés*).

Nicolardot, *le Vanadium* (Collection Léauté, 1905) (*Généralités et Constitution*) ; — *Revue d'Artillerie*, mars, avril et mai 1904 (*Étude chimique et fabrication*) ; — *Comptes Rendus*, t. CXXXVIII, 1904 (*Étude chimique*).

ACIERS AU SILICIUM

Baker, *Iron and Steel Institute*, septembre 1904 (*Propriétés, Fabrication*).

Carnot et Goutal, Société d'Encouragement, p. 493 (*Étude chimique*) ; — *Annales des Mines*, octobre 1900 (*Id.*).

Guillet, *Revue de Métallurgie*, p. 46, 1904 (*Micrographie et Propriétés*) ; — *Comptes Rendus*, 14 décembre 1903 ; — *Ingénieurs civils de France*, juillet 1904 (*Propriétés*).

Hadfield, *On alloys of iron and silicon* (*Journ. of the Iron and Steel Inst.*, 1899, II, p. 222).

Le Chatelier, *Contribution à l'étude des alliages*, Société d'Encouragement, p. 413 (*Résistance électrique*).

Ledebur, *Ueber den Einfluss eines Siliciumgehalts auf Schmiedbares Eisen* (*Stahl und Eisen*, 1889, p. 1000) ; — *Ueber Bildung von Kieselsaüre auf Roheisen* (*Stahl und Eisen*, 1900, p. 582).

Muller, *Untersuchungen über den Einfluss des Siliciums auf die Beschaffenheit des Werkzeugstahls* (*Stahl und Eisen*, 1888, p. 375) ; — *Eisensiliciumverbindungen* (*Stahl und Eisen*, 1899, p. 796).

Mzakek, *Experimentelle Untersuchungen über Silicium und Manganum Stahl Jahrb. d. k. k. Bergakad*, t. XX, p. 406.

Osmond, *Comptes Rendus*, 1er septembre 1890 (*Points de transformation*) ; — *Comptes Rendus*, 12 octobre 1891 (*Étude chimique*).

ACIERS A L'ALUMINIUM

Borsig, *Versuche Ueber den Zusatz von Aluminium zum Roheisen* (*Stahl und Eisen*, 1894, p. 6).

Guillet, *Revue de Métallurgie*, avril 1905 (*Micrographie et Propriétés*) ; — *Comptes Rendus*, 3 juillet 1905 (*Id.*) ; — *Ingénieurs civils de France*, juillet 1904 (*Propriétés*).

Hadfield, *On alnminium Steel* (*Iron and steel Inst.*, 1890, II, p. 161).

Hogg, *On the influence of aluminium upon the carbon in ferro carbon alloys* (*Iron and Steel Inst.*, 1894, II, p. 104).

Melland und H. Waldron, *Ueber den Einfluss eines Aluminiumgehalts auf Gusseisen* (*Stahl und Eisen*, 1901, p. 54; — *Iron and Steel Inst.*, 1900, II, p. 244).

Osmond, *Comptes Rendus*, 12 octobre 1891 (*Étude chimique*).

ACIERS AU COBALT

Dumas, *Recherches sur les aciers au nickel* (Dunod) (*Propriétés*).

Guillet, *Comptes Rendus*, 26 juin 1905 (*Micrographie et Propriétés*) ; — *Ingénieurs civils de France*, juillet 1904 (*Propriétés*) ; — *Revue de Métallurgie*, mai 1905 (*Micrographie et Propriétés*).

Hadfield, *Iron and Steel Institute* (*Propriétés*).

AUTRES ACIERS TERNAIRES

Akermann, *Die Beziehungen von Wolfram und Titan zum Eisen* (*Zeits. d. berg u. hütten Ver. f. Steiermark u. Kärnthen*, 1876, p. 326).

Billings, *Ueber die Eigenschaften der Verbindungen des Eisens mit anderen Metallen* (*Dingl. polyt. Journ.*, t. CCXXVIII, p. 427) ; — *Ueber den Einfluss eines Zinngehalts auf die Qualität von Eisen und Stahl* (*Stahl und Eisen*, 1901, p. 330).

Guillet, *Revue de Métallurgie*, p. 500, 1904 (*Aciers au titane*), p. 506, 1904 (*Aciers à l'étain*) ; — *Ingénieurs civils de France*, juillet 1904 (*Propriétés*).

Moissan et Charpy, *Sur l'acier au bore* (*Comptes Rendus*, t. CXXX, p. 130, 1895).

Warren, *Boron-iron* (*Engin. and Mining journ.*, t. LVI, p. 619).

Zugger, *Ueber den Einfluss des Zinngehalts auf die Qualität von Eisen und Stahl* (*Stahl und Eisen*, 1901, p. 400).

ACIERS NICKEL-CHROME

Abraham, *Annales des Mines*, t. XIV, 1898, p. 225 (*Fabrication et propriétés*).

Babu, *Ann. des Mines*, série 9, t. XV, p. 429 (*Points de transformation*).

Dumas, *Recherches sur les aciers au Nickel* (Dunod) (*Id.*).

ACIERS CHROME-TUNGSTÈNE. — ACIERS A COUPE RAPIDE

Brown, *American Machinist*, XXVII, p. 737, 1904 (*Utilisation*).

Gledhill, *Engineering*, LXXVI, p. 759, 1903 (*Id.*); — *Engineer*, XCVII, p. 266, 1904 (*Fabrication et usages*).
Guillet, *Ingénieurs civils de France*, mai 1905 (*Théorie*).
Jacobs, *Ann. Engin. and Railroad Journal*, LXXVIII, 333, 1904 (*Utilisation*).
Le Chatelier, *Revue de Métallurgie*, juillet 1904 (*Propriétés*).
Markham, *American Machinist*, XXVII, p. 659, 1904 (*Utilisation*).
Osmond, *Revue de Métallurgie*, juin 1904 (*Théorie*).
Vose, *American Machinist*, XXVII, p. 586, 1904 (*Utilisation*).

ACIERS NICKEL-MANGANÈSE

Hadfield, *Iron and Steel Institute*, mai 1905 (*Magnétisme*).

ACIERS CHROME-VANADIUM

Riall Sankey et Kent Smith, *Institution of Mechanical Engineers*, 1904 (*Traitements et compositions*).

CHAPITRE V

ALLIAGES UTILISÉS EN SIDÉRURGIE

Les principaux alliages utilisés dans la fabrication des aciers ordinaires ou des aciers spéciaux sont par ordre approximatif d'importance :

1° Les ferro-manganèses;
2° Les ferro-siliciums;
3° Les ferro-aluminiums;
4° Les ferro-chromes;
5° Les ferro-tungstènes;
6° Les ferro-molybdènes;
7° Les ferro-vanadiums;
8° Les ferro-titanes.

Il est bien entendu que l'on trouvera déjà des renseignements intéressants sur la constitution de ces alliages dans les chapitres précédents. Nous ne donnerons ici que les résultats des observations micrographiques que nous avons faites sur ces produits. Nous nous empressons d'ajouter que nous devons la plupart des échantillons que nous avons étudiés à l'amabilité de la Société électro-métallurgique et de son directeur M. Paul Girod.

FERRO-MANGANÈSES

Parmi les alliages de fer et de manganèse, on distingue :

1° Le ferro-manganèse proprement dit, dont la teneur en manganèse est supérieure à 25 0/0;

2° Les spiegels, qui contiennent moins de 25 0/0 de manganèse. Parfois même on distingue le petit spiegel, qui renferme 5 à 7 0/0 de Mn.

Étude théorique. — Les observations que nous avons faites sur les ferro-manganèses et les spiegels nous ont donné les résultats suivants :

Sur les spiegels : cristaux magnifiques entourés d'eutectique. Ces cristaux apparaissent par polissage en bas-relief et sont colorés en gris par le picrate de soude en solution sodique. Ils doivent être formés d'un carbure double. Dans les ferro-manganèses, le fond de la masse semble être formé de la même matière, qui est en grande abondance. On voit peu de perlite.

L'étude de MM. Carnot et Goutal semble prouver, comme nous l'avons vu, l'existence des composés

$Fe^3C,4Mn^3C$	pour des teneurs	en manganèse	de 74 à 85 0/0
$Fe^3C,2Mn^3C$	—	—	de 60 à 74 0/0
$2Fe^3C,Mn^3C$	—	—	de 30 à 60 0/0
$4Fe^3C,Mn^3C$			au-dessus de 18 0/0

Mais il ne faut pas oublier que le silicium et le soufre se combinent au manganèse pour donner les composés MnSi et MnS.

Les ferro-manganèses ne doivent pas contenir le carbure Mn^3C découvert par MM. Troost et Hautefeuille.

Étude industrielle. — HISTORIQUE. — L'étude industrielle des alliages fer-manganèse est liée essentiellement au développement de la sidérurgie. Aussi croyons-nous devoir rappeler brièvement l'historique de leur utilisation.

C'est vers la fin du XVIII° siècle que Binman découvrait qu'en fondant de la fonte grise avec de l'oxyde de manganèse en parites égales on produit un métal blanc, fragile et qui n'est pas attiré par l'aimant.

D'autre part, des minerais spathiques de Siegen (Allemagne),

traités au haut-fourneau, donnaient des fontes blanches, extrêmement fragiles, à grandes facettes, qui les ont fait appeler *fontes spéculaires* ou *miroitantes* (*spiegeleisen*) ; elles ont une teneur en manganèse qui va de 5 à 12 0/0.

Vers 1839, Heat avait noté l'intérêt que semblait présenter l'addition du manganèse dans la préparation de certains aciers dans l'Inde. Il apporta le fruit de ses observations aux métallurgistes de Sheffield et fabriqua du manganèse métallique en réduisant l'oxyde par du charbon. On nota que le manganèse rendait les aciers plus malléables. Mushet fabriqua ensuite des fontes riches en manganèse et en proposa l'emploi à Bessemer, à une époque où celui-ci, ne sachant pas désoxyder et décarburer son métal, se butait à des difficultés considérables de laminage et de martelage, et l'on peut dire que c'est l'intervention du manganèse qui assura l'existence du procédé Bessemer.

Fabrication. — Sur la demande de Bessemer, Henderson, chimiste d'une usine anglaise où l'on fabriquait des quantités importantes de chlore en partant des oxydes de manganèse, essaya d'utiliser les résidus de sa fabrication.

Il y réussit en employant un four Martin dont la sole était faite en briques de graphite ou de coke. L'alliage obtenu ainsi renfermait 22 à 25 0/0 de manganèse.

D'un autre côté, Prieger de Bonn prépara, en 1866, un alliage à 70-80 0/0 de manganèse en réduisant dans un creuset le peroxyde de manganèse par le carbone.

La Compagnie de Terre-Noire, qui a joué un rôle si important dans la vulgarisation de ces produits, centralisa bientôt la production de ces alliages de fer et de manganèse tant par le procédé au four Martin que par le procédé au creuset.

Mais on fut rapidement conduit à remplacer ces modes de fabrication par l'emploi du haut-fourneau.

Déjà, en 1873, à l'Exposition de Vienne, on avait remarqué des échantillons de spiegel à 20 0/0 de manganèse qui provenaient d'un haut-fourneau de Suède et du ferro-manganèse à 33 0/0, produit par un haut-fourneau de Carniole.

En 1874, il fut fait à Montluçon des essais sur la préparation d'un spiegel renfermant 26 0/0 de manganèse. Mais c'est en 1875 que M. Pourcel entreprit aux usines de Terre-Noire la fabrication du ferro-manganèse au haut-fourneau ; il obtint de suite des teneurs de 63 0/0 et arriva bientôt à 75 et 80 0/0 de manganèse. Peu après, d'autres usines, Saint-Jacques à Montluçon, Saint-Louis à Marseille, entrèrent dans la même voie[1].

Il n'est peut-être pas inutile de rappeller qu'en 1875 le rôle du manganèse était encore discuté par Siemens.

Pour les ferro-manganèses, on utilise les minerais riches du Caucase, du Chili et de l'Espagne (45 à 57 0/0 Mn); pour les spiegels, les minerais de Siegen, de Carthagène (10 à 20 0/0 Mn).

La fabrication des ferro-manganèses au haut-fourneau est basée sur la réduction des oxydes de manganèse et des oxydes de fer par le carbone ou l'oxyde de carbone.

Le manganèse, quelle que soit la forme sous laquelle il est introduit, est amené à l'état d'oxyde salin Mn^3O^4 sous l'influence de la chaleur, à quelques mètres au-dessous du gueulard. Quand il est introduit à l'état de bioxyde de manganèse MnO^2, il y a un dégagement d'oxygène très important d'après la réaction bien connue :

$$3MnO^2 = Mn^3O^4 + O^2 ;$$

d'où combustion très intense du carbone.

L'oxyde de manganèse est d'abord réduit à l'état de protoxyde par l'oxyde de carbone. Il est amené à l'état de manganèse métallique par contact avec le carbone. Ceci a lieu, bien entendu, au-dessus des tuyères. Il s'allie au fer qui a pris naissance par réduction de l'oxyde chargé dans le haut fourneau.

1. M. Carnillo a signalé qu'en 1885 un haut fourneau des ateliers Edgard Thompson produisait un ferro-manganèse à 94 0/0 de manganèse obtenu en partant d'un minerai de Virginie.

Dans cette fabrication, il y a toujours des pertes importantes de manganèse ; ces pertes atteignent jusqu'à 25 0/0 de la quantité contenue dans le lit de fusion en allure chaude.

Un autre mode de fabrication du ferro-manganèse réside dans l'emploi du four électrique.

Dans cette fabrication, on utilise des fours du même genre que ceux à carbure. Mais, au lieu de marcher à 45 ou 50 volts, il est préférable de se tenir à 29 ou 30 volts. On allume le four en marchant à 50 volts; puis, quand il est très chaud et qu'on a déjà un peu de métal, on baisse doucement le voltage à 30 volts environ. On charge complètement le four, qui marche alors en résistance. On supprime ainsi la majeure partie de la perte de manganèse par distillation. On emploie notamment le mélange suivant :

Minerai de Romanèche (30 0/0 Mn).............	81,3
Anthracite anglais (à 4-5 0/0 de cendres)........	17,8
Spath-fluor....................................	0,9
	100,0

Avec 4.000 kilogrammes de ce mélange, on obtient 800 kilogrammes de ferro-manganèse à 85 0/0 de manganèse.

Cette fabrication ne présente aucune difficulté et un même ouvrier conduit aisément deux fours.

Il faut, d'ailleurs, ajouter que le four électrique n'est pas arrivé à concurrencer le haut-fourneau pour cet alliage. Le prix de revient est trop élevé et les frais de transport sont trop considérables pour être aisément supportés par ce produit de valeur relativement peu élevée, et l'on ne prépare à peu près au four électrique que le ferro-manganèse nécessaire à la fabrication du silico-spiegel, que nous décrivons plus loin.

Enfin l'aluminothermie permet d'obtenir, comme nous l'avons déjà dit, du manganèse métallique.

Propriétés. — Le ferro-manganèse est toujours d'un beau blanc d'argent. Sa teneur en carbone est d'environ 6 0/0.

Lorsqu'il ne renferme pas de silicium, tout le carbone est à l'état combiné.

En présence de quantités importantes de silicium (plus de 5 0/0), la teneur en carbone tombe et peut descendre au-dessous de 2 0/0.

Voici des compositions de différents alliages de fer et de manganèse.

PRODUITS	MÉTHODES DE PRÉPARATION	Mn	C	Si	Ph	Al
Spiegel	Haut-fourneau	20,60	4,90	0,20	0,08	»
Ferro-manganèse	Haut-fourneau	83,40	6,50	0,80	0,25	»
Ferro-manganèse	Four électrique	85,33	»	»	»	»
Manganèse......	Aluminothermie	96,50	»	2,73	»	0,57

Utilisations. — Le ferro-manganèse a trois emplois distincts :

1° La désoxydation et la recarburation des aciers ordinaires (Bessemer, Thomas et Martin), ainsi que nous l'avons rapidement expliqué dans le chapitre III;

2° La fabrication des aciers au manganèse, dont nous avons donné les types employés dans le chapitre précédent;

3° La préparation de quelques alliages intéressants, tels que bronzes et laitons ferro-manganésés.

FERRO-SILICIUMS

Étude théorique (Album, Pl. XXXI). — Nous avons déjà rappelé, à propos des aciers au silicium, les recherches faites sur les ferro-siliciums. Nous entrerons ici dans des détails complémentaires.

Hahn fut le premier à s'occuper des alliages fer-silicium. Il

chercha à les obtenir en faisant agir simultanément le silicium et le sodium sur un chlorure double de fer et de sodium. Il obtint ainsi un produit à 20 0/0 de silicium qui laissait dans l'acide fluorhydrique un résidu à 50 0/0 de silicium de formule $FeSi^2$. Frémy obtint ensuite un composé cristallisé contenant 33 0/0 de silicium et de formule FeSi, en faisant agir le chlorure de silicium sur le fer chauffé au rouge.

Par action directe du silicium sur le fer ou sur l'oxyde de fer, M. Moissan obtint, en 1895, un troisième composé Fe^2Si.

En partant d'un mélange de quartz, de charbon et de fer chauffé au four électrique, M. de Chalmot a obtenu des alliages qu'il dit être formés du composé $FeSi^2$ et Si^2Fe^3.

D'autre part, M. Lebeau, en 1899, faisait réagir le fer sur un excès de siliciure de cuivre à la température du four électrique. On traite le culot obtenu par l'acide azotique pour dissoudre le siliciure de cuivre et par la soude pour enlever la silice formée dans l'opération. On obtient alors de très beaux cristaux correspondant à la formule FeSi.

MM. Carnot et Goutal ont pu obtenir, en attaquant un ferro-silicium pauvre en manganèse par l'acide sulfurique, un résidu cristallin magnétique correspondant à FeSi.

M. Osmond, en traitant un échantillon à 11,72 0/0 de silicium par le chlorure double de cuivre et d'ammonium, a obtenu un résidu renfermant 19,20 0/0 de silicium et correspondant sensiblement à Fe^2Si. M. Lebeau est arrivé au même résultat sur des ferro-siliciums à 10 et 20 0/0 de silicium.

Nous avons dit déjà les résultats auxquels nous sommes arrivés sur les aciers au silicium.

D'autre part, il a été isolé différents siliciures de manganèse qui entrent assurément dans la constitution des produits industriels, surtout des silicospiegels.

M. Vigouroux a isolé le composé Mn^2Si ; M. de Chalmot, la combinaison $MnSi^2$; et MM. Carnot et Goutal, le corps MnSi. Enfin, M. Lebeau a donné des modes de préparation de ces différentes combinaisons (*Bulletin de la Société Chimique de Paris*, t. XXIX, p. 185, 1903). Il a, de plus, étudié certains pro-

duits industriels dans lesquels il a retrouvé les composés Mn^2Si et MnSi.

Étude industrielle. — FABRICATION. — M. Valton fut le premier à entreprendre, en 1872, la fabrication du ferro-silicium aux aciéries de Terre-Noire ; il utilisait le creuset et réduisait un mélange d'oxyde de fer et de silice sur le charbon ; on obtenait ainsi un alliage renfermant 10 à 12 0/0 de silicium. En partant de fonte en grenailles, de silice et de charbon, on pouvait atteindre 22 0/0 de silicium.

En 1875, M. Pourcel fit les premiers essais de fabrication du ferro-silicium au haut fourneau dans l'usine de Terre-Noire.

Le ferro-silicium ainsi obtenu devait permettre d'obtenir des aciers sans soufflure. La présence de l'alumine dans le lit de fusion facilite singulièrement la préparation du ferro-silicium ; l'alumine donne un aluminate de chaux et la silice reste libre et peut être réduite par le carbone; les laitiers doivent donc être peu calcaires et chargés en alumine.

M. Pourcel, en vue de la fabrication des silicospiegels à 20 0/0 de manganèse et 12 0/0 de silicium, ajouta au lit de fusion du sulfate de baryte ; d'une part, il avait des laitiers plus fusibles et, d'autre part, la formation de silicate était moins aisée qu'avec la chaux.

On part, en somme, de minerais de fer quartzeux ou de minerais additionnés de sable ou encore de battitures de fer mélangées de silice.

Mais le haut-fourneau ne permettait guère que la préparation d'alliages à 10 et 12 0/0 de silicium ; en tous les cas, le maximum que l'on pouvait atteindre était 15 0/0. Actuellement on produit, comme nous allons le voir, des alliages à beaucoup plus haute teneur en silicium au four électrique. On peut employer à cet effet l'une des deux méthodes suivantes : on peut, comme le fait la Wilson Aluminium Company, réduire un minerai de fer mélangé de silice par le charbon ou bien réduire la silice par le carbone et absorber le silicium ainsi formé par du fer que l'on ajoute.

Lorsqu'on agit en présence de minerai de fer, on obtient des produits à très faible teneur en carbone, celui-ci étant brûlé par l'oxygène de l'oxyde.

Dans le second mode de fabrication, il est de toute évidence que le fer ne joue que le rôle de solvant, qu'il est utilisé surtout pour rassembler aisément le silicium.

En France, on emploie surtout comme silice celle qui provient de la Tarentaise et de l'Isère.

Nous donnerons quelques mélanges qui sont employés dans les fours électriques de 500 chevaux (400 kilowatts, 50 volts et 8.000 ampères).

Pour ferro-silicium à 25 0/0 de silicium :

Silice (quartzite)......................	68	kilogrammes
Anthracite (à 10 ou 12 0/0 de cendres)..	35	—
Fer..................................	60	—

Pour ferro-silicium à 50 0/0 de silicium :

Silice (quartzite)......................	68	kilogrammes
Anthracite...........................	35	—
Fer..................................	15	—

Pour ferro-silicium à 80 0/0 de silicium :

Silice (quartzite)......................	68	kilogrammes
Anthracite...........................	35	—
Fer..................................	Néant	

On voit donc que le fer contenu dans le ferro-silicium à 80 0/0 provient uniquement du fer que renferment l'anthracite et la quartzite.

Pour ferro-silicium extra-riche à 85 ou 90 0/0 de silicium :

Cristal de roche......................	70	kilogrammes
Anthracite (à 4,25 de cendres)..........	30	—
Fer..................................	Néant	

Théoriquement, c'est-à-dire d'après l'équation :

$$SiO^2 + 2C = Si + 2CO,$$

il faudrait 24 kilogrammes de carbone pour 60 kilogrammes de silice, soit 28 kilogrammes de carbone pour 70 kilogrammes de silice. On en emploie 30 kilogrammes ; il y a 2 kilogrammes qui compensent les cendres, d'une part, et, d'autre part, la perte qui se fait sous forme d'oxyde de carbone au moment de la charge du four.

D'ailleurs, la façon dont on conduit le four joue un très grand rôle. Si l'ouvrier a soin de bien couvrir son four, il pourra utiliser beaucoup moins de charbon qu'un autre qui le laissera brûler à la surface. De plus, il peut se produire des fumées blanches qui accusent une perte de silice par volatilisation ; on l'évite toujours en couvrant avec soin le four. Lorsque le charbon n'est pas en quantité suffisante, on note la présence de laitiers au moment de la coulée ; il y a donc de la silice non réduite. S'il y a excès de charbon, il se forme du siliciure de carbone ; la coulée devient alors très difficile, si même elle n'est pas impossible.

L'une des difficultés dans la fabrication du ferro-silicium est d'éviter le phosphore. La déphosphoration n'est pas possible en présence de silice; aussi faut-il surveiller tout spécialement la teneur en phosphore des matières premières, fer et anthracite.

D'autre part, on utilise aux usines de Botzel un procédé se rapprochant du précédent. Mais ici la préparation du ferro-silicium n'est que le corollaire de la fabrication du carbure de calcium. On réduit la chaux par le charbon de façon à produire la réduction :

$$CaO + 3C = C^2Ca + CO,$$

mais en utilisant un charbon renfermant d'importantes quantités de cendres riches en silice. Cette silice est réduite par le charbon, et l'on ajoute du fer pour dissoudre le silicium formé.

Cette méthode de fabrication a découlé du fait que l'on rencontre toujours dans les fours à carbure un dépôt de ferro-silicium.

Un très grand avantage réside en ce que l'on ne diminue pas la production du carbure, tout en préparant du ferro-silicium.

On peut dans un four produisant 1.700 kilogrammes de carbure en vingt-quatre heures produire simultanément 960 kilogrammes de ferro-silicium; et le carbure de calcium obtenu a sensiblement le rendement normal. On charge, bien entendu, la fonte en même temps que la chaux et le charbon. Le four possède deux trous de coulée, un dans la partie haute pour le carbure, l'autre dans la partie basse pour le ferro-silicium. Il faut avoir bien soin de ne pas couler la couche de séparation.

On obtient donc tout le ferro-silicium comme sous-produit sans nuire à la fabrication du carbure. Il semble même que ce produit facilite l'opération.

Le tableau ci-dessous indique les résultats obtenus dans 4 fours, dont les numéros 1, 2, 3 produisent seulement du carbure de calcium, tandis que le four 4 produit à la fois du carbure de calcium et du ferro-silicium pendant le même laps de temps.

MARCHANT AU CARBURE SEUL			MARCHANT AU CARBURE ET AU FERRO-SILICIUM
FOUR 1	FOUR 2	FOUR 3	FOUR 4
	Production :		Carbure : 1.714 kilogrammes
1.930 kil.	1.517 kil.	1.854 kil.	Ferro-silicium : 96 kilogrammes
Moyenne : 1.767 kil.			

Mais, dans cette fabrication, il est nécessaire d'utiliser des produits de tout premier choix, notamment de la chaux absolument exempte de phosphore. Tout le phosphore contenu dans

les matières premières passe dans le ferro-silicium.

Propriétés. — Plus la teneur en silicium est élevée, plus l'alliage fer-silicium est blanc d'argent. La fragilité et la dureté augmentent également avec la teneur en silicium, tandis que la densité et le magnétisme décroissent. A partir de 20 à 25 0/0 de silicium, ces alliages résistent d'une façon remarquable aux agents chimiques.

Les principaux types de ferro-siliciums sont :

1° Le ferro-silicium préparé au haut-fourneau ; il renferme :

Cu	6 à 7
Si	10 à 12 0/0

2° Les ferro-siliciums fabriqués au four électrique :

a. — TYPE RENFERMANT 30 0/0 DE SILICIUM
ANALYSE D'UN DES ÉCHANTILLONS D'ALBERTVILLE

C	0,27
Si	32,70
Al	0,13
Mn	0,31
Cu	0,06
S	0,04
Ph	0,05

b. — TYPE RENFERMANT 50 A 52 0/0 DE SILICIUM
ANALYSE D'UN ÉCHANTILLON D'ALBERTVILLE

C	0,09
Si	48,70
Al	0,17
Mn	0,13
Cu	0,00
S	0,03
Ph	0,04

c. — TYPE RENFERMANT DE 75 A 80 0/0 DE SILICIUM
ANALYSE D'UN ÉCHANTILLON D'ALBERTVILLE

C	0,00
Si	75,80
Al	0,08
Mn	0,11
Cu	0,00
S	0,02
Ph	0,02

d. — TYPE CONTENANT DE 97 A 98 0/0 DE SILICIUM, VENDU GÉNÉRALEMENT SOUS LE NOM DE SILICIUM PUR

Mais il est difficile de dépasser 91 0/0, il faut utiliser des quartz extrêmement purs.

De plus, il faut employer des fondants qui empêchent l'oxydation du silicium.

Utilisations. — Les ferro-siliciums servent à obtenir :

1° L'affinage des aciers (particulièrement dans la fabrication de l'acier moulé ; la présence du silicium diminue les soufflures) ;

2° La transformation des fontes blanches en fontes grises ;

3° La préparation des aciers spéciaux.

La transformation des fontes blanches en fontes grises découle du fait de la précipitation du carbone à l'état de graphite par le silicium; le problème est important, puisqu'il permet d'obtenir des fontes douces faciles à usiner et plus résistantes qu'avant le traitement.

Silicospiegel (Phot. 124, Pl. XXXI). — Cet alliage préféré aux ferro-siliciums dans certains de leurs emplois, notamment le traitement des aciers en vue d'éviter la soufflure, est formé de fer, de carbone, de silicium et de manganèse. Il contient généralement 20 0/0 de manganèse, comme les spiegels riches et 8 à 12 0/0 de silicium.

Il fut préparé pour la première fois au haut-fourneau, en 1875, par M. A. Pourcel. Il fallait marcher en allure très chaude avec une charge réduite et très peu de castine.

M. Pourcel avait entrepris cette fabrication en vue d'améliorer les moulages d'acier qui possédaient peu d'allongements. On sait tout le succès que remporta cette importante découverte du silico-spiegel.

Le type le plus courant du silico-spiegel se rapproche toujours de l'analyse suivante :

C..................	2 à 2,5
Mn..................	20
Si..................	10 à 12 (exceptionnellement 20 0/0)

Avec le four électrique on fabrique des alliages de fer, manganèse et silicium à teneur beaucoup plus élevée en manganèse. Voici l'exemple d'un échantillon qui nous a été envoyé d'Albertville :

C	1,25
Mn	74,17
Si	19,20
Al	0,60
Cu	0,55
Mn	0,60
Cu	0,15
S	0,00
Ph	0,015

Pour préparer ces alliages au four électrique, on procède généralement de la façon suivante : d'une part, dans un four à arc, on fabrique le ferro-silicium ; d'autre part, dans un four à résistance, on fait du ferro-manganèse. On coule chaque alliage dans des poches tarées et on réunit les deux alliages liquides dans une seule poche. Immédiatement le silicium précipite une grande partie du carbone renfermé dans le ferro-manganèse; ce graphite remonte à la surface du bain, où il forme une couche veloutée superbe. Après refroidissement, on n'a qu'à l'enlever au balai.

L'utilisation de ces produits se trouve dans l'affinage des aciers moulés.

Signalons que l'on commence à utiliser le carbure de silicium (carborundum) pour le même usage.

FERRO-ALUMINIUMS

Nous renvoyons pour l'étude théorique et industrielle des alliages fer-aluminium au chapitre XXII, dans lequel nous avons rassemblé tout ce qui touche aux alliages d'aluminium.

FERRO-CHROMES

Étude théorique (Album, Pl. XXXII et XXXIII). — Nou savons que les aciers au chrome renferment un carbure double dont la composition semble variable avec la teneur en chrome; nous savons notamment que le picrate de soude colore d'autant moins facilement ce carbure que le produit renferme plus de chrome.

Si l'on attaque un acier très riche en chrome par l'eau régale, le carbure, lorsqu'il est riche en chrome, est respecté. L'une des micrographies représente ce fait d'une façon très nette, les pointements étant le carbure (Phot. 125, Pl. XXXII).

Ces cristaux de carbure, nous les avons retrouvés dans les ferro-chromes; ils sont parfois très développés et souvent entourés d'eutectique, comme le montre l'une des photographies (Phot. 128, Pl. XXXII).

Dans les ferro-chromes à 65 0/0 Cr et 5 0/0 C, il est très difficile de faire apparaître la texture par attaque à l'eau régale. Si pour la même teneur en chrome la teneur en carbone augmente, il n'y a plus d'attaque, et la masse paraît même homogène ; c'est ce que nous avons obtenu sur un ferro-chrome à 65 0/0 Cr et 9 0/0 C. Parfois on trouve le carbure en lamelles entourées de perlite et qui ne sont pas susceptibles d'être colorées par le picrate ($Cr = 65$; $C = 7$).

Pour des teneurs en chrome très élevées (99 0/0), on obtient des polyèdres immenses de chrome entourés de petites quantités de carbure qu'il est impossible de colorer.

Nous donnons deux micrographies représentant ce phénomène (Phot. 131 et 132, Pl. XXXIII).

L'étude chimique des ferro-chromes a donné des résultats qui ont quelque intérêt. MM. Carnot et Goutal ont isolé les carbures doubles suivants :

$Fe^3C,3Cr^3C^2$ dans des ferro-chromes à 59 0/0 de chrome et 9 0/0 C en les traitant par l'acide chlorhydrique.

$3Fe^3C,Cr^3C^2$ dans des aciers chromés à 2 0/0 Cr et 2 et 0,5 0/0 C.

D'autre part, M. Moissan a isolé au four électrique le carbure C^3C^2.

MM. Behrens et Van Linge ont obtenu un carbure auquel ils ont donné la formule Cr^3FeC^2 en traitant un ferro-chrome à 50 0/0 de chrome par l'acide chlorhydrique concentré. Il n'y a pas d'ailleurs grande différence entre cette formule et celle ($3Fe^3C,2Cr^3C^2$) donnée par MM. Carnot et Goutal. Enfin, M. Williams a obtenu au four électrique un carbure $3Fe^3C,2Cr^3C^2$.

M. H. Le Chatelier a montré que le chrome modifie très peu la résistance électrique des aciers (il en est de même du tungstène et du molybdène); il semble donc bien ne pas être à l'état dissous.

Étude industrielle. — Historique. — Il y a fort longtemps que l'on a envisagé la question des alliages de fer et de chrome. Dans son remarquable mémoire, présenté au Congrès international des Mines et de la Métallurgie de 1889, M. Brustlein remarque que Berthier fait mention des aciers au chrome dans un travail publié en 1820 et que, insistant sur la manière de produire le ferro-chrome, il prédit qu'on s'en servira pour introduire le chrome dans l'acier fondu. Plus tard, Boussaingault s'est aussi préoccupé de cette question et a signalé notamment la présence de 3 à 4 0/0 de chrome dans des fontes fabriquées avant 1867, aux environs de Medellin, province d'Antiochia (Amérique méridionale).

C'est cependant aux États-Unis qu'on a produit en premier lieu les aciers au chrome pour l'industrie sur une échelle peu considérable. M. Rolland, ingénieur au Corps des Mines, a publié, en 1878, un rapport sur la fabrication des aciers chromés à grande résistance qui était installée à Brooklyn. En 1875, M. Brustlein commença ses essais aux aciéries Jacob Holtzer, à Unieux; ce fut le début d'une nouvelle branche de l'industrie métallurgique en Europe.

Fabrication. — La fabrication des ferro-chromes s'est faite tout d'abord au creuset. On mélangeait le minerai de chrome préalablement amené à l'état de poudre avec 6 à 8 0/0 de charbon de bois ou d'anthracite et on fondait dans un creuset en graphite en présence de fondants, fluorures alcalins additionnés de chaux, borax mélangé de carbonate, verre à bouteille, etc., et on portait à une température très élevée. Les minerais utilisés à Unieux renfermaient 27 0/0 de chrome et 14 0/0 de fer. A Brooklyn on employait des minerais qui renfermaient de 21 à 46 0/0 de chrome. Le ferro-chrome a été produit plus tard au haut-fourneau et au four à vent, avec des teneurs allant jusqu'à 60 0/0 de chrome et un peu au delà.

Actuellement les ferro-chromes pauvres sont obtenus encore au creuset et les ferro-chromes riches sont préparés au four électrique par réduction directe du minerai (chromite) par le charbon, la chaleur de fusion étant fournie par le courant électrique. On utilise des minerais à 50 0/0 d'oxyde Cr^2O^3 provenant de Turquie, Calédonie, Canada, etc.

L'un des mélanges les plus usités pour la fabrication du ferro-chrome est le suivant :

Minerai de chrome à 50-51 0/0 de Cr^2O^3..	100 kilogrammes
Anthracite anglais......................	21 —

On obtient ainsi un ferro-chrome renfermant 60 à 64 0/0 de chrome et 9 0/0 environ de carbone.

Pour le raffiner, on peut concasser l'alliage ainsi obtenu et le placer dans un lit ayant la composition suivante :

Minerai de chrome pulvérisé	14 kilogrammes
Chaux.................................	2 —

Ceci pour 100 kilogrammes de métal à affiner.

En répétant l'opération plusieurs fois, on peut descendre à une teneur de 4 0/0 de carbone. Pour atteindre ce pourcentage, il faut même utiliser des fours ne contenant aucune trace de carbone, et l'on doit produire l'arc entre deux électrodes qui

se trouvent absolument en dehors du bain métallique, sans quoi il y aurait, bien entendu, recarburation.

Pour obtenir des ferro-chromes contenant moins de 4 0/0 de carbone, il faut employer des méthodes qui sont tenues absolument secrètes, et cela à un point tel qu'aux usines du Giffre les fours où se fait cette fabrication sont entourés de murs.

Voici d'abord les premiers types des ferro-chromes qui ont été exposés en 1889 par les aciéries d'Unieux :

Type I :

C	9 0/0
Cr	84 0/0

culot obtenu en réduisant sans excès de charbon du sesquioxyde de chrome dans un creuset en magnésie.

Type II :

C	7,5 0/0
Cr	82 0/0
Si	8,2 0/0

culot obtenu en réduisant du sesquioxyde de chrome dans un creuset de graphite.

Type III :

C	11 0/0
Cr	80 0/0

culot obtenu en réduisant du sesquioxyde de chrome dans un creuset brasqué.

Type IV :

C	3,46 0/0
Cr	71,5 0/0

culot de ferro-chrome riche contenant très peu de carbone.

Ces quatre premiers types doivent être regardés plutôt comme des échantillons de laboratoire que comme des produits industriels.

Il faut, en effet, partir, pour les avoir, de sesquioxyde très pur et par conséquent très coûteux.

Type V :

C	8,6 0/0
Cr	60 0/0

Type VI :

C	8 0/0
Cr	50 0/0

Type VII :

C	5 0/0
Cr	30 0/0
Si	8 0/0

C'est un silico-ferro-chrome.

Type VIII :

C	3 0/0
Cr	25 0/0

Type IX :

C	2 à 3 0/0
Cr	15 à 16 0/0

Type X :

C	5 0/0
Cr	7 0/0
Si	0,40 0/0
Mn	0,38 0/0

Le type industriel le plus courant fabriqué actuellement au haut-fourneau ou au cubilot a pour teneur :

C	8 à 9 0/0
Cr	50 à 60 0/0

Voici maintenant les analyses d'une série de produits obtenus aux usines d'Albertville.

Ferro-chrome pour blindages et aciers à outils :

C..................	5,00
Cr..................	65,20
Si..................	0,61
Al..................	0,23
Mn..................	0,27
Cu..................	0,17
Mg..................	0,37
S..................	0,01
Ph..................	0,02

Ce même ferro-chrome purifié par une deuxième fusion a donné :

C..................	7,15
Cr..................	65,20
Si..................	0,22
Al..................	0,07
Mn..................	0,13
Cu..................	0,53
Mg..................	0,12
S..................	0,01
Ph..................	0,007

Ferro-chrome pour blindages et projectiles :

C..................	9,07
Cr..................	64,10
Si..................	1,27
Al..................	0,18
Mn..................	0,47
Ca..................	traces
Mg..................	0,13
S..................	0,02
Ph..................	0,02

Ferro-chrome pour acier trempant à l'air :

C..................	1,87
Cr..................	66,40
Si..................	0,22
Al..................	0,03
Mn..................	traces
Mg..................	0,17
S..................	0,01
Ph..................	0,007

Chrome obtenu au four électrique par réduction d'oxyde de chrome en présence de carbone :

C....................	0,21
Cr...................	98,96
Mn...................	0,10
S....................	0,00
Ph...................	0,00

Cet alliage est d'ailleurs difficile à obtenir, le chrome s'oxydant aisément.

La Société *la Néo-Métallurgie* et les usines du Giffre préparent, par une méthode spéciale que la première a créée, du ferro-chrome ne contenant que 0,5 0/0 de carbone et 62 à 65 0/0 de chrome.

Propriétés. — Les propriétés des ferro-chromes ont été particulièrement étudiées par M. Brustlein, qui a montré que l'aspect de la cassure varie bien plus avec la teneur en carbone et en silicium qu'avec la teneur en chrome.

Lorsque ces alliages sont fortement chargés de carbone et silicium ou de carbone seul, ils présentent une structure aciculaire. Leur dureté et leur fragilité croissent avec leur teneur en ces éléments.

Pour les alliages à teneur relativement faible en carbone (2 à 3 0/0) et en chrome (16 0/0), on a une cassure présentant de petits clivages rectangulaires.

Utilisations. — Les ferro-chromes sont utilisés pour la fabrication des aciers chromés dont nous avons indiqué les intéressantes propriétés dans le chapitre précédent.

FERRO-TUNGSTÈNES

Étude théorique (Album, Pl. XXXIV). — Différents carbures de tungstène ont été isolés : W^2C, obtenu, par M. Moissan, par union directe du carbone et du tungstène au four électrique ; WC, obtenu par Williams en réduisant l'acide tungstique par le charbon en excès, en présence de carbure de fer qui servait de dissol-

vant. Cette dernière préparation peut être rapprochée de celle du composé FeSi, obtenu par M. Lebeau dans des circonstances analogues. D'autre part, MM. Carnot et Goutal ont isolé d'aciers carburés (2 et 2,2 0/0 de carbone) renfermant l'un 6,1, l'autre 7,8 de tungstène, le carbure double Fe^3C,WC, les traitant par l'acide chlorhydrique étendu.

M. Williams a obtenu aussi au four électrique le composé $2Fe^3C,3W^2C$. M. Behrens a signalé dans les ferro-tungstènes à 50 0/0 de tungstène un alliage cristallisé en octaèdres dont la formule serait voisine de Fe^2W, et MM. Carnot et Goutal ont isolé dans un acier peu carburé (C = 0,500) et renfermant 6 0/0 de tungstène un composé répondant sensiblement à la formule Fe^3W.

D'autre part, de ferro-tungstène préparé à Philadelphie en 1892, M. de Benneville put isoler le composé Fe^4W.

Enfin, dans les usines Biermann, au Hanovre, on isola, à différentes reprises, de grands cristaux correspondant à la formule $Fe^3W^3C^3$.

On voit combien ces résultats sont complexes et variés.

Dans les examens micrographiques que nous avons faits sur les ferro-tungstènes, nous avons rencontré dans l'attaque à l'eau régale de la perlite et des plages blanches (Phot. 133, Pl. XXXIV); ces dernières se colorent inégalement par le picrate. Elles sont formées probablement d'un carbure double dont la composition n'est pas constante.

Dans les alliages les plus riches en tungstène et suffisamment carburés, on peut colorer toute la surface, hormis quelques grains qui restent d'un blanc très net (Phot. 134, Pl. XXXIV). Enfin dans les alliages à très haute teneur en tungstène, mais très peu carburés (0,38); on trouve des cristaux blancs durs entourant une masse facile à rayer; les cristaux se colorent par le picrate. Ce doit être du carbure double entourant du tungstène (Phot. 135 et 136, Pl. XXXIV).

Étude industrielle. — Fabrication. — Dans sa remarquable étude sur *les Aciers au tungstène*, M. Hadfield dit que M. Bier-

mann, du Hanovre, fut le premier à préparer, en 1866, les ferro-tungstènes. Ce savant donne aussi les détails suivants sur la fabrication des ferro-tungstènes aux usines de la Société *Tungstene and Rare Metals*, de Londres; le tungstate de soude est préparé en chauffant le minerai pulvérisé avec du carbonate de soude. Ce tungstate de soude, dissous dans l'eau, est traité par un acide qui en précipite l'acide tungstique.

Cette préparation délicate peut donner lieu à des pertes importantes par la formation d'un hydrate soluble de l'acide tungstique. Par contre, il faut se méfier de la décomposition incomplète du tungstate de soude, que l'on retrouve ensuite dans l'alliage de tungstène.

Finalement l'acide tungstique est mêlé avec des matières charbonneuses et chauffé dans des creusets à une température élevée. Un chauffage insuffisant peut amener une diminution considérable dans le rendement. Mais la méthode la plus répandue de préparation des ferro-tungstènes est celle qui emploie le four électrique.

On utilise alors directement le minerai de tungstène (Wolfram).

Les ferro-tungstènes que l'on prépare ainsi renferment plus de 50 0/0 de tungstène.

M. Defacqz a obtenu au four électrique une fonte de tungstène par la réduction du minerai de tungstène au moyen du charbon. Le minerai employé était celui de Zinwald (Bohême).

Il avait pour composition moyenne :

TuO^3	71,76
SiO^2	1,69
FeO	7,60
MnO	16,30
CaO	2,28

On mélange le minerai avec le charbon dans les proportions suivantes :

Minerai	100 parties
Coke	14 —

On chauffe dix à douze minutes avec un courant de 950 à 1.000 ampères sous 50 à 60 volts dans un four Moissan. On a obtenu une masse métallique dont la composition est la suivante :

Tu	92,53
Si	0,49
Fe	2,37
C	5,21
	100,60

Le métal est entouré d'une scorie qui se détache facilement grâce à une petite couche de carbure qui se délite à l'air.

Voici un exemple de fabrication industrielle du ferrotungstène; le mélange employé était le suivant :

Minerai	100 kilogrammes
Anthracite anglais	250 —

Le traitement avait lieu dans un four à arc de 5 à 6.000 ampères sous 50 volts.

Le minerai utilisé avait pour composition :

Acide tungstique	69,2
Silice	2,2
Peroxyde de fer	18,7
Manganèse	4,0

On avait obtenu 500 kilogrammes de ferro-tungstène dont la composition était la suivante :

W	50,99
C	0,43
Fe	11,44
Ph	0,014
Si	0,88
Mn	6,84

Nous donnerons de suite les analyses des échantillons de la Société électro-métallurgique.

Premier type. — Destiné à la fabrication au four Martin des aciers à ressort ou des outils à basse teneur de tungstène.

C	1,56
W	64,70
Si	0,33
Mn	0,43
Al	0,09
Sn	traces
S	0,01
Ph	0,007

Ce ferro-tungstène relativement pauvre présente l'avantage d'une assez grande fusibilité et, par conséquent, d'une grande facilité de dissolution homogène dans la masse, question plus délicate au four Martin qu'au creuset.

Il faut employer un minerai très pur, qui contient environ 70 0/0 d'acide tungstique et qui provient d'Australie ou de la province de Guarda (Portugal).

Deuxième type. — Ce type contient 80 0/0 W et 1,5 0/0 C. Comme le précédent, c'est un produit assez carburé. Mais on ne peut guère diminuer la teneur en carbone par traitement direct du minerai; car il faut craindre l'oxydation du tungstène pendant la décarburation, du moins, en cherchant à l'obtenir par les mêmes moyens que pour les alliages ferchrome.

Troisième type. — Alliage spécial pour aciers au creuset à très haute teneur en tungstène. Cet alliage s'obtient très peu carburé par une méthode spéciale dont nous indiquerons le principe. Voici d'abord l'analyse du produit obtenu :

C	0,38
W	87,40
Si	0,13
Mn	0,00
Al	0,00
Sn	traces
S	0,007
Ph	0,009

Pour obtenir cet alliage, on raffine un ferro-tungstène ren-

fermant 85 0/0 de tungstène et 3 0/0 de carbone par le minerai lui-même. On entoure les blocs de l'alliage de minerai, et l'on chauffe le tout à très haute température dans un four électrique à résistance. On obtient ainsi un alliage dont les deux caractéristiques sont de contenir plus de 85 0/0 de tungstène et 0,3 à 0,5 0/0 de carbone.

L'alliage du type n° 2 est obtenu comme sous-produit de l'opération précédente. Il se dépose au fond du four et sur les côtés et forme très souvent des cristallisations ayant une composition régulière. On n'a pas encore pu expliquer ce dépôt sur le fond et sur les côtés; ce fait est d'autant plus bizarre que la température est certainement plus élevée en ces endroits qu'au milieu.

Utilisations. — Les emplois des différents ferro-tungstènes se résument dans la préparation des aciers au tungstène dont nous avons étudié les propriétés et l'utilisation dans le chapitre précédent.

FERRO-MOLYBDÈNES

Étude théorique (Album, Pl. XXXV). — Les résultats micrographiques que nous avons obtenus sur les ferro-molybdènes sont en tous points semblables à ceux recueillis sur les ferro-tungstènes : corps durs entourant un constituant plus mou, le premier se colorant par le picrate de soude.

MM. Carnot et Goutal ont isolé des ferro-molybdènes les composés suivants :

Fe^3Mo^2 d'aciers peu carburés;

Fe^3Mo^2C d'aciers fortement carburés.

Étude industrielle. — Fabrication. — Le ferro-molybdène s'obtient au four électrique en traitant l'acide molybdique ou plutôt la molybdénite ou sulfure MoS^2. En employant ce dernier minerai, on arrive à une teneur de soufre inférieure à 0,2 et qui est même généralement de 0,02 à 0,05.

D'ailleurs, M. Guichard a préparé du molybdène chargé en carbone, en traitant au four électrique la molybdénite.

Voici la composition de la molybdénite employée par M. Guichard et qui provenait de Suède :

Mo................	59,5 0/0
S..................	39,0 0/0
Fe................	0,9 0/0
Si.................	0,4 0/0
	99,8 0/0

Chauffé dans un tube de charbon au four électrique de M. Moissan avec un arc de 350 ampères et 60 volts, ce minerai donne déjà un dégagement de soufre et les morceaux de molybdénite perdent leur brillant; quelques-uns présentent des traces de fusion avec un arc de 900 ampères et 50 volts; en deux minutes, il y a fusion de la molybdénite avec abondant dégagement de soufre; les morceaux conservent grossièrement la forme qu'ils avaient avant la chauffe ; ils ont une cassure cristalline et renferment des géodes garnies d'aiguilles de sesquisulfure. En chauffant trois minutes dans les mêmes conditions, on dissocie le sesquisulfure et la décomposition est presque complète. Le métal produit renferme encore du soufre. Enfin, en cinq minutes, le métal formé se sature de carbone qui chasse les dernières portions de soufre. La fonte obtenue ne renferme plus ni soufre, ni silicium.

Voici d'ailleurs l'analyse du produit obtenu par M. Guichard :

Mo.................	91,3
Fe..................	2,1
C....................	7,2
	100,6

Les ferro-molybdènes que livre actuellement l'industrie sont de deux espèces : le ferro-molybdène ordinaire, qui renferme environ 50 0/0 de molybdène et de 1 à 3 0/0 de carbone, moins lorsqu'il est affiné, et le ferro-molybdène riche renfermant jusqu'à 80 à 85 0/0 de molybdène.

Voici d'ailleurs les analyses données par les usines d'Albertville sur ses produits.

Type I. — Ferro-molybdène ordinaire :

C	1,87
Mo	52,30
Si	0,17
Al	traces
S	0,03
Pb	0,03

Type II. — Ferro-molybdène affiné :

C	0,340
Mo	52,00
Si	0,09
S	0,01
Pb	0,009

Type III. — Ferro-molybdène riche :

C	2,27
Mo	84,80
Si	0,11
S	0,02
Pb	0,007

On peut même obtenir du molybdène presque pur au four électrique.

Utilisations. — La seule utilisation du ferro-molybdène se trouve dans la fabrication des aciers spéciaux.

FERRO-VANADIUMS

Étude théorique (Album, Pl. XXXVI). — Les observations au microscope nous ont toujours montré les rognons de carbure de vanadium (Phot. 141 et 142, Pl. XXXVI). Ils présentent les deux particularités suivantes : ils sont d'autant plus abondants que le produit renferme plus de carbone ; ils

sont d'autant plus difficiles à colorer par le picrate que le ferro-vanadium renferme plus de vanadium.

Étude industrielle. — M. Herrenschmidt a donné, dans une note à l'Académie des Sciences (présentée, le 24 octobre 1904, par M. Ditte), une méthode intéressante de traitement du minerai de vanadium, telle qu'elle est faite à l'usine du Bas-Coudray à Le Genest (Mayenne).

Le minerai traité est un vanadate de plomb provenant des mines de Santa Martha (Espagne); il contient de 12 à 14 0/0 d'acide vanadique et environ 50 0/0 de plomb. Le minerai est fondu dans un four à réverbère avec du carbonate de soude et du charbon. Il se forme du plomb métallique contenant l'argent du minerai et une scorie contenant des vanadate, aluminate, silicate de soude, ainsi que de l'oxyde de fer. Pour rendre cette scorie soluble dans l'eau, qui ne la dissout que peu, on la fond dans un four à réverbère et, une fois fondue, on y insuffle de l'air jusqu'à ce que tout le vanadium soit complètement peroxydé. La masse est alors coulée dans l'eau bouillante pour la grenailler, puis la laver. Après trois lessivages, les résidus, qui se composent principalement d'alumine, de silice et d'oxyde de fer, ne contiennent plus que 2 0/0 d'acide vanadique; comme par tonne de minerai traité, il reste 280 kilogrammes de ce résidu, on amène, par suite, en solution 95 0/0 de l'acide vanadique contenu dans le minerai; les résidus sont ultérieurement attaqués par l'acide sulfurique.

La solution de vanadate de soude ne contient pas d'alumine, et même, si l'on ajoutait de l'aluminate de soude dans la solution de vanadate, cette alumine se précipiterait.

Pour enlever la silice contenue dans le vanadate de soude impur, on opère comme il suit : on évapore à consistance de sirop une certaine quantité de ce vanadate et on y ajoute alors de l'acide sulfurique à 66°; il se forme de l'acide vanadique et du sulfate de soude; mais tout le vanadium n'est pas précipité; il reste dans la liqueur environ 10 0/0 de celui que contenait le vanadate. Le mélange est alors mis en contact avec la solu-

tion de vanadate impur et, après un brassage énergique, on passe au filtre-presse. La totalité de la silice venant du silicate de soude est ainsi précipitée, tandis que le vanadium reste dans la liqueur.

La solution de vanadate alcalin ainsi débarrassée de la silice ne contient plus d'autres impuretés. On la concentre et l'acide vanadique est précipité par un excès d'acide sulfurique. On évapore à sec pour chasser l'excès d'acide sulfurique et on lave. On produit ainsi de l'acide vanadique à 92,95 0/0. Les 5 à 8 0/0 d'impuretés proviennent de l'eau de lavage, qu'il faut employer en grande quantité.

Les ferro-vanadiums sont préparés soit par aluminothermie, soit au four électrique. Par aluminothermie on fait agir l'aluminium sur un mélange d'oxyde de fer et d'acide vanadique à proportions convenables.

Au four électrique on réduit l'acide vanadique par le carbone en présence de fer.

On est arrivé à abaisser beaucoup la teneur en carbone de ces alliages.

Voici, d'ailleurs, l'analyse qui nous a été donnée par les usines d'Albertville d'un ferro-vanadium dont nous donnons la micrographie.

On remarquera sa faible teneur en carbone.

C...............	1,07
Va..............	49,50
Si..............	0,09
Mn..............	0,07
Cu..............	0,10
S...............	0,009

FERRO-TITANES

Etude théorique (Album, Pl. XXXVI). — Les ferro-titanes présentent au microscope un corps qui apparaît par attaque à l'eau régale, ou même, par simple polissage en bas-relief (Phot. 143 et 144, Pl. XXXVI).

Ce doit être le même élément que celui signalé dans les aciers au titane, soit une combinaison fer-titane, soit une solution solide.

Étude industrielle. — Les minerais de fer titanifères contiennent ordinairement de 10 à 20 0/0 de titane et parfois jusqu'à 40 0/0. Ces minerais sont extrêmement abondants, notamment en Suède, Norvège, Canada, Caroline du Nord, etc. Pour préparer le ferro-titane, on réduit le minerai au four électrique.

Dans une étude sur *la Métallurgie du Titane* (*Journal of Franklin Institute*, CLIV, 1902), M. A.-J. Rossi donne une méthode de préparation de ces alliages qui est très intéressante : au four électrique on fond l'aluminium et on ajoute de l'acide titanique qui est alors réduit avec une élévation notable de température. Cet alliage renfermant encore de l'aluminium est débarrassé de ce métal par une addition finale d'oxyde de fer. On obtient ainsi des alliages presque complètement exempts de carbone et renfermant de 10 à 75 0/0 de titane. L'alliage à 10 0/0 a la couleur de l'argent, une cassure grossière ; sa densité est d'environ 5,74.

A Albertville, la Société électrométallurgique réduit au four électrique du rutile suédois ou norvégien. Le produit obtenu est raffiné en présence d'oxyde.

Voici l'analyse d'un ferro-titane provenant d'Albertville analyse de l'usine) :

C	3,20
Ti	52,00
Al	0,31
Mg	0,29
Si	1,21
S	0,03
Ph	0,02

Le même raffiné :

C	0,47
Ti	56,17
Al	0,25
Mg	0,19
Si	0,87
S	0,02
Ph	0,03

Le ferro-titane commence à être employé comme améliorant des fontes et pour diminuer les soufflures. Les usines de Niagara Falls en produisent des quantités relativement importantes. Cet alliage est peut-être appelé à jouer un rôle important comme épurateur des aciers au point de vue de l'azote (Voir l'*Appendice*). Il est bon de signaler que le Dr Goldschmidt a préconisé depuis quelque temps l'emploi d'une *thermite titane* qui est formé de :

TiO^2	23
Oxyde de fer	45
Al	25
Fondants	7 0/0

et qui sert dans la préparation des moulages. En somme, on produit le ferrotitane au sein même du bain liquide.

FERRO-BORES

Le ferro-bore est obtenu en partant du borate de chaux. L'échantillon que nous a envoyé l'usine d'Albertville avait pour composition (analyse de l'usine) :

C	2,855
Bo	32,10
S	0,03
Ph	0,005
Indéterminé	0,32

La Société *la Néo-Métallurgie* prépare du ferro-bore à 14 0/0 de bore, ainsi que du *nickelo-bore* à 15-20 0/0 Bo et 85 à 80 0/0 Ni.

FERRO-NICKEL

On prépare aussi au four électrique un ferro-nickel. Pour cela, on emploie généralement un minerai renfermant :

Silice	34
Peroxyde de nickel	26,4
Peroxyde de fer	20,29
Humidité	12,93

En prenant 6.000 kilogrammes de ce minerai auquel on ajoute 1.648 kilogrammes d'anthracite et 1.600 kilogrammes de chaux, on obtient 1.250 kilogrammes de ferro-nickel contenant:

Si	7,85
Ni	64,20
Fe	25,50
P	0,02
C	1,22

FERRO-URANIUM

L'emploi de cet alliage a été signalé dans les aciéries Krupp (*Mines et Minerals*, décembre 1904). Aucun détail n'a d'ailleurs été donné sur cet alliage et sur son influence sur les propriétés du fer.

AUTRES ALLIAGES PLUS COMPLEXES

Il est préparé au four électrique des alliages plus complexes que ceux que nous venons d'étudier. Ils sont, eux aussi, utilisés en sidérurgie.

Nous citerons :

L'alliage silicium-manganèse qui a pour composition :

Mn	67 à 75
Si	33 à 25

Cet alliage est fait surtout à l'usine de Rochefort-sur-Mayenne appartenant à la Société *la Néo-Métallurgie ;* il est

utilisé dans la fabrication des aciers extra-doux. Il se rapproche des silico-spiegels, qui ont des teneurs variables en manganèse et silicium et dont nous avons déjà parlé.

La même usine prépare, depuis peu de temps, un *mangano-siliciure d'aluminium* ayant pour composition la plus ordinaire :

Mn	45
Si	35
Al	20
C	0,20 maximum

Il a les mêmes usages que le précédent.

Enfin, dans ces tout derniers temps, on a lancé des alliages dans lesquels le nickel se substitue en tout ou en partie au fer. On a obtenu ainsi des ferro-nickelo-siliciums, des ferro-nickelo-chromes, etc.

L'avantage que présentent ces alliages réside dans une bien moindre oxydabilité que les produits ordinaires et dans une plus grande fluidité permettant de les mieux incorporer dans le bain d'acier. Nous donnerons la composition de quelques-uns de ces alliages :

Ferro-nickelo-silicium (Albertville) : cet alliage a été obtenu directement du minerai calédonien à 5 0/0 de nickel :

Ni	30 0/0
Si	47,20
Al	2,90
Mn	0,90
Ca	0,15
Mg	0,57
P	0,02
Cu	2,58

Nickelo-chrome utilisé surtout pour la préparation des blindages :

C	1,00
Cr	72,75
Ni	24,00
Si	0,25

La Société *la Néo-Métallurgie* descend par affinage à 0,50 0/0 de carbone.

Nickelo-tungstène (cet alliage est très peu usité) :

W	75 à 50
Ni	25 à 50
C	0,50 à 1
Si	0,25 à 0,50

Chromo-molybdène :

Mo	50
Cr	30
C	0,50

pour aciers à coupe rapide.

Nickelo-molybdène :

C	0,5 à 1,5
Mo	50 à 70
Ni	50 à 30
Si	0,25 à 0,50

Serait utilisé pour préparer des pièces de forge et des arbres d'hélices, des obus, des blindages, etc. (*Ann. Manuf. and Iron World*, 1903).

En terminant, nous tenons à dire que le phosphure de fer, dont nous parlerons en détails au chapitre suivant, commence à être utilisé en aciérie, cela en vue de donner à l'acier une teneur déterminée en phosphore d'environ 0,15 0/0, qui rend l'acier facile à travailler et à polir. On ne peut pas, évidemment, utiliser cet acier pour tous les emplois, étant donnée sa fragilité assez grande.

D'autre part, enfin, il est bon de signaler que l'on cherche à lancer, en Amérique surtout, des alliages de fer et de métaux alcalins comme réducteurs. C'est ainsi que l'on commence à employer en fonderie un ferro-sodium qui contient ordinairement 25 0/0 de sodium.

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE V

TRAITÉS GÉNÉRAUX

Gautier (Ferdinand), *les Alliages ferro-métalliques* (Congrès de Métallurgie, Paris, 1889).

Von Juptner, *Sidérologie*, Bérenger, éditeur.

Knab, *les Alliages métalliques.*

Ledebur, *Manuel de la Métallurgie du fer*, t. I et II, Bérenger, éditeur.

SUR LES FERRO-MANGANÈSES

Brown, *Journal pratik. chim.*, XVII (*Carbures de manganèse*).

Carnot et Goutal, *Comptes Rendus*, 23 juillet 1899 (*Étude chimique*) ; — *Contribution à l'étude des alliages* (Société d'Encouragement) (*Id.*); — *Comptes Rendus*, 2 mai 1898 (*Id.*).

Cloez, *Comptes Rendus*, LXXXVI (*Propriétés chimiques*).

De Chalmot, *American Chemical Journal*, t. XVIII, p. 118 (*Étude chimique*).

Frémy, *Encyclopédie*, article *Fer*, t. XX, p. 83 (*Id.*).

Gautier (Ferdinand), *Génie Civil*, 1889 (*Propriétés*).

Hahn, *Annalen der Chemie and Pharmacie*, t. CXXIX, p. 57 (*Étude chimique*).

Jordan, *Bulletin de la Société des Ingénieurs civils*, Paris, 1877 (*Fabrication*).

Knab, *les Alliages Métalliques* (*Généralités*).

H. Le Chatelier, *Comptes Rendus*, 13 juin 1898 (*Résistance électrique*); — *Contribution à l'étude des Alliages métalliques* (Société d'Encouragement) (*Id.*).

Moissan, *le Manganèse* (*Encyclopédie chimique*), 1886 (*Généralités*).

Osmond, *Congrès de Chimie appliquée*, CXIII, 474 (*Recherches calorimétriques*).

Pourcel, *Génie civil*, 1885 (*Fabrication*).

Terreil, *Bulletin de la Société chimique*, 1874 (*Généralités*).

Troost et Hautefeuille, *Comptes Rendus*, CXXX, 909 (*Fontes manganesifères*) ; 12 avril 1875 (*Carbure de manganèse*).

SUR LES FERRO-SILICIUMS

Boussaingault, *Annales de Physique et de Chimie*, XVI (*Constitution*).

Carnot et Goutal, *Comptes Rendus*, t. CXXVI, 1898, p. 1240 (*Constitution*); — *Contribution à l'étude des Alliages métalliques* (*Id.*).

De Chalmot, *American Chemical Journal*, t. XVIII, p. 118 (*Constitution*).
Euverte, Société des Ingénieurs civils, 1877 (*Utilisation*).
Frémy, *Encyclopédie chimique*, article *Fer* (*Constitution*).
Hahn, *Annalen der Chemie und Pharmacie*, t. CXXIX, p. 57 (*Id.*).
Jouve, *Bulletin de la Société chimique*, t. XXV, 1901, p. 290 (*Id.*).
Jordan, *Fabrication des fontes extra siliciées*, Paris 1873 (*Fabrication*).
H. Le Chatelier, *Comptes Rendus*, t. CXXVI, 1898, p. 457 (*Constitution*).
Lebeau, *Annales de Physique et de Chimie*, t. XVI, 1899 (*Constitution*); mai 1902 (*Id.*); — *Comptes Rendus*, t. CXXVIII, p. 933 (*Id.*); — Congrès de Chimie appliquée, 1900 (*Id.*).
Moissan, *Comptes Rendus*, t. CXXI, p. 13 et p. 794 (*Id.*).
Muller, *Génie civil*, 1884 (*Utilisation*).
Osmond, *Comptes Rendus*, t. CXIII, p. 474 (*Constitution*).
Pourcel, *Iron and Steel Institute*, 1882 (*Utilisation*).
Stead, *Journal of the Iron and Steel Institute*, 1898 (*Constitution*).
Troost et Hautefeuille, *Comptes Rendus*, t. LXXXI, p. 264 (*Id.*).
Williams, *Comptes Rendus*, t. CXXVI, p. 1722 (*Id.*).

SUR LES FERRO-CHROMES

Berthier, *Annales de physique et de chimie*, XVII, 1821 (*Généralités*).
Behrens et Van Linge, *Recueil des Travaux chimiques des Pays-Bas*, t. XIII, 2, 1894.
Boussaingault, *Bulletin de la Société chimique*, XXXII, 1878 (*Constitution*).
Brustlein, *Congrès de Métallurgie, Paris*, 1889 (*Fabrication et Propriétés*); — *Revue de Métallurgie*, juillet 1905 (*Fabrication et Emplois*).
Carnot et Goutal, *Comptes Rendus*, 2 mai 1898 (*Propriétés chimiques*); — *Contribution à l'étude des Alliages* (Société d'Encouragement) (*Id.*).
Guillet, *Rapport au Congrès de Métallurgie de Liège*, 1905 (*Propriétés et Fabrication*).
H. Le Chatelier, *Comptes Rendus*, 13 juin 1898 (*Résistance électrique*).
Lisbonne, *Génie civil*, 1887 (*Projectiles*).
Williams, *Comptes Rendus*, 3 octobre 1898 (*Constitution*).

SUR LES FERRO-TUNGSTÈNES

Carnot et Goutal, *Comptes Rendus*, 23 janvier 1899 (*Étude chimique*); — *Contribution à l'étude des Alliages métalliques* (*Id.*).
Defacqz, Thèse de Doctorat, Gauthier-Villars, 1901 (*Préparation*).
Guillet, *Rapport au Congrès de Métallurgie de Liège*, 1905 (*Propriétés et Fabrication*).
Hadfield, *Iron and Steel Institute*, septembre 1904 (*Préparation*).
H. Le Chatelier, *Comptes Rendus*, 13 juin 1898 (*Résistance électrique*).
Williams, *Comptes Rendus*, 12 septembre 1898 (*Id.*)

SUR LES FERRO-MOLYBDÈNES

Americ. Manuf. and Iron World, p. 809, 1903 (*Emploi*).
Carnot et Goutal, *Comptes Rendus*, 23 janvier 1899 (*Étude chimique*); —

Contribution à l'étude des Alliages métalliques (*Étude chimique*).
Guichard, Thèse de doctorat, Gauthier-Villars, 1901 (*Préparation*).
Guillet, *Rapport au Congrès de Métallurgie de Liège*, 1905 (*Propriétés et Fabrication*).
H. Le Chatelier, *Comptes Rendus*, 13 octobre 1898 (*Étude chimique*).
Williams, *Id.*, 3 octobre 1898 (*Id.*).

SUR LES FERRO-VANADIUMS

Guillet, *Revue de Métallurgie*, octobre 1904, p. 525 (*Micrographie*); — *Comptes Rendus*, t. CXXXVIII, p. 367, 1904 (*Id.*); — *Rapport au Congrès de Métallurgie de Liège*, 1905 (*Fabrication et Propriétés*).
Herrenschmidt, *Comptes Rendus*, 24 octobre 1904 (*Préparation*).
Moissan, *Comptes Rendus*, t. CXVI, p. 1225, 1893 (*Étude chimique*).
Nicolardot, *Comptes Rendus*, t. CXXXVIII, 1904 (*Id.*); — *Revue d'Artillerie*, mai 1904 (*Id.*); — *le Vanadium*, Gauthier-Villars (*Généralités*).

SUR LES FERRO-TITANES

Carnot et Goutal, *Contribution à l'étude des Alliages métalliques* (Société d'Encouragement) (*Étude chimique*).
Guillet, *Revue de Métallurgie*, p. 506, 1904 (*Micrographie*); — *Rapport au Congrès de Métallurgie de Liège*, 1905 (*Fabrication et Propriétés*).
Rossi, *Journal of the Franklin Institute*, CLIV, 1902 (*Préparation*).

SUR LES AUTRES ALLIAGES

Engin. Review, X, 186, 1904 (*Divers*).
Mines et Minerals, décembre 1904 (*Ferro-uranium*).
Moissan et Konsnetzow, Société de Chimie, XXXI, p. 562, 1904 (*Carbure double de chrome et tungstène*).
Sjostedt, *Electro-chemical Industry*, II, p. 188, 1904 (*Ferro-nickel*).

———

CHAPITRE VI

AUTRES ALLIAGES DE FER

Fe-Cu ; Fe-Sn ; Fe-Pb ; Fe-Sb ; Fe-Zn ; Fe-Ph ;

ALLIAGES DE FER ET DE CUIVRE

Étude théorique (Album, Pl. XXXVIII). — Les alliages de fer et de cuivre ont été l'objet d'une étude très remarquable de la part de M. Stead, qui l'a présentée au Congrès des Ingénieurs de l'Exposition de Glasgow (1901) ; elle a été publiée dans l'*Engineering* (20 décembre 1901) et dans le *Bulletin de la Société d'Encouragement* (février 1902).

Nous ne pouvons qu'en résumer ici les principales lignes.

Les expériences faites ont montré que :

1° Le fer et le cuivre s'allient en toute proportion par fusion directe, sans qu'il y ait jamais tendance à la séparation des éléments en deux couches liquides conjuguées ;

2° La série complète de ces alliages peut se diviser en trois sections :

A. Alliages depuis des traces jusqu'à 2,73 0/0 de fer ;

B. Alliages renfermant de 2,73 0/0 de fer à 92 0/0 de fer ;

C. Alliages contenant plus de 92 0/0 de fer.

Tous ces produits sont de véritables alliages, sans globules ni nodules de fer ou de cuivre.

Les alliages de la première section, qui contiennent jusqu'à 2,73 de fer, ont une apparence homogène et ne renferment qu'un seul constituant; ils ont tous l'apparence du cuivre pur; l'alliage durcit avec la teneur en fer. Ils sont formés de grains

isomorphes de fer et de cuivre. Pour les alliages de la seconde section (dès que l'on dépasse 2,73 0/0 de fer) on trouve un constituant séparé qui présente des cristallisations très nettes à six rayons. Lorsqu'on approche de 10 0/0 de fer, ces cristallites se transforment en dendrites, qui sont séparées par une solution fer-cuivre renfermant 2,73 0/0 de fer en solution (Phot. 149 à 152, Pl. XXXVIII).

Les alliages de la troisième section, qui contiennent plus de 92 0/0 de fer, sont parfaitement homogènes et ne laissent voir aucune trace de cuivre.

En chauffant doucement les surfaces polies jusqu'à ce qu'elles prennent une teinte jaune pâle, les grains cristallins se colorent différemment; l'oxydation commence aux limites extérieures de ces grains et se continue vers leurs centres. On a aussi observé que ce réchauffage oxyde l'alliage d'autant plus vite qu'il renferme plus de cuivre, ce qui entraîne la conclusion que, dans ces alliages, au refroidissement, la partie qui se solidifie la première et se sépare de la dissolution est plus riche en fer et qu'à mesure des progrès de la cristallisation la phase liquide devient de plus en plus riche en cuivre, jusqu'à ce que la dernière partie se solidifie avec la teneur en cuivre maximum. Quand cette teneur dépasse 8 0/0, les cristaux de cuivre-fer rejettent l'excès d'alliage cuivre-fer qu'ils ne retiennent pas en solution.

M. Stead a cherché ensuite l'influence du carbone sur les alliages fer-cuivre. Il a pu constater que Mushet avait fait, en 1853, une remarque très juste en disant que le cuivre s'allie d'autant plus facilement avec le fer qu'il est plus pauvre en carbone. Le carbone, en se combinant avec le fer, rejette une grande partie du cuivre de la dissolution. Ce cuivre se précipite alors au bas du creuset, entraînant du fer contenant un peu de carbone.

La présence du carbone limite la quantité de cuivre que peut dissoudre le fer à 7,5 0/0 par exemple, pour le cas d'une fonte d'hématite à 3 0/0 de silicium et à 15 0/0 avec de l'acier à 1 0/0 de carbone.

Il faut attribuer à l'influence du carbone les anomalies que l'on rencontre dans les diverses opinions exprimées sur les alliages fer-cuivre.

Étude industrielle. — On a essayé dans ces dernières années de tirer parti des alliages fer-cuivre.

Divers essais ont été faits; ils ne sont pas encore très concluants.

Ces alliages sont préparés par fusion directe de cuivre granulé et de tournure de fer.

Cette fusion se fait à la température de fusion du fer.

On a cherché à appliquer notamment les alliages à 50 0/0 de cuivre aux coussinets, à la fabrication des hélices, etc. Aucun compte rendu de ces essais n'a encore été publié et nous n'avons pu obtenir que des renseignements vagues ou intéressés. Mais nous savons que la seconde fusion de ces alliages présente de graves difficultés.

Il est à noter, cependant, qu'une maison anglaise fait un alliage cuivre-fer à 8 0/0 de fer, et une maison française tous alliages entre 0 et 50 0/0. Ceci est intéressant pour la préparation de certains laitons[1].

ALLIAGES DE FER ET D'ÉTAIN

Nous avons dit quelques mots des aciers à l'étain dans le chapitre consacré aux *Aciers spéciaux*. Nous avons signalé, dans certains de ces aciers, des cristaux qui nous semblaient

1. Nous apprenons, au dernier moment, qu'une Maison française lance des alliages cuivre-fer à 2 0/0 Fe qui se soudent fort bien et sont essayés par la construction navale. D'autre part, un alliage cuivre-fer à 8 0/0 Fe a donné :

A 15° :

R	33,5
E	22,4
A 0/0	28

A 25° :

R	24,4
E	17,3
A 0/0	28

Ces résultats sont assurément du plus haut intérêt.

devoir correspondre à une combinaison fer-étain. Ceci nous a conduit à entreprendre l'étude de ces alliages. Bien qu'elle soit loin d'être terminée, nous pouvons confirmer l'existence d'une combinaison ou d'une solution dont nous donnons d'ailleurs une micrographie très nette (Phot. 146, Pl. XXXVII).

Nous ne connaissons aucune étude théorique faite sur ces alliage. Mais Guettier (*Guide pratique des alliages métalliques*) a donné quelques résultats pratiques intéressants. « On trouve, dit-il, que le fer et l'étain peuvent s'allier en toutes proportions. Mais les alliages sont cassants et deviennent d'autant moins fusibles qu'ils contiennent plus de fer. »

La présence, même faible, du fer dans l'étain rend l'étain plus dur et moins malléable, d'un aspect plus terne. D'un autre côté, une très petite partie d'étain dans le fer rend ce métal cassant à froid et encore plus fragile à chaud. Du fer chargé d'étain ne peut se forger et tombe en éclats sous le marteau.

La fonte qui contient de l'étain peut montrer, à la cassure, un grain aussi fin que celui de l'acier. Elle devient noire et peut acquérir, comme la plupart des métaux durs, un beau poli, moins disposé à l'oxydation que le poli des fontes ordinaires. Divers essais ont été tentés pour rendre les fontes inoxydables à l'aide d'un alliage en petite proportion d'étain.

Quelques recherches ont montré à Guettier que l'on augmenterait inutilement la valeur de la fonte par addition d'étain en la rendant plus dure et plus difficile à travailler, sans lui donner pourtant les qualités nécessaires pour résister convenablement à l'oxydation.

La proportion de 2 0/0 de fer dans l'étain suffit pour rendre l'étain attirable à l'aimant, pour lui enlever son éclat et pour le rendre dur et sec.

La même proportion d'étain dans la fonte rend la fonte sèche et cassante, et le fer qui provient de cette fonte est dur et privé d'une partie de sa malléabilité.

Un alliage de fer 30, étain 70, offre une cassure d'un gris foncé et conserve une certaine ductilité sans objet, du reste,

pour les ressources de l'industrie. Un alliage de fer 50, étain 50, est blanc, fragile et à cassure grenue.

Un alliage fer 70, étain 30, est cristallin, d'une texture gris de fer et peut être aisément pulvérisé sous le marteau.

Un alliage de fer 90, étain 10, est d'un ton gris clair.

Le grain, sec et mat, se laisse très difficilement attaquer par la lime. Cet alliage est très sec, très cassant et d'une grande dureté. Usé sur la meule, il donne un poli brillant, d'un blanc grisâtre.

La seule utilisation des alliages fer-étain, en dehors de l'étamage qui ne saurait être considéré comme la production, à proprement parler, d'un alliage, réside dans leur emploi pour l'étamage de certains métaux, notamment du cuivre. On a employé pendant longtemps un alliage renfermant environ

Sn........................	75
Fe........................	25

Thénard a recommandé un alliage plus fusible, moins dur et à grains plus serrés que le précédent.

Sa composition correspond à environ :

Sn........................	79
Fe........................	11

ALLIAGES DE FER ET DE PLOMB

Le plomb ne s'allie pas avec le fer. On sait depuis longtemps que, si l'on jette du plomb dans du fer fondu, on retrouve le plomb au fond du bain. On a noté qu'en jetant du plomb dans un bain de fonte on produit un certain mouvement de brassage qui paraît développer la fluidité de la fonte. A ce sujet Guettier fait remarquer que les mouleurs coulant des pièces minces ou les ouvriers chargés de mouler de grandes pièces s'appuient sur ce phénomène pour jeter du plomb dans la fonte en fusion et empêcher ce métal de se figer rapidement contre les parois des poches de coulée.

Le même auteur dit avoir obtenu « une espèce de *saturation* du fer par le plomb » dans des alliages brassés énergiquement et coulés rapidement.

Soumis à l'analyse, ils n'offraient que des traces de plomb indiquant plutôt le passage de ce métal dans la fonte qu'un alliage sérieux.

La fonte ainsi traitée était durcie; sa densité était sensiblement dans les limites de la densité des fontes ordinaires, soit environ 7,2.

Biewend d'une part, Heldt d'autre part, ont obtenu, par réduction d'un mélange d'oxyde de fer et de plomb, un alliage renfermant 3,24 0/0 de plomb ; il était magnétique et très dur.

Sonnenschein a rencontré dans un haut-fourneau un alliage, de formule Pb^2Fe, qui se présente en aiguilles très fines du système cubique. L'alliage était magnétique.

ALLIAGES DE FER ET D'ANTIMOINE

Les alliages de fer et d'antimoine n'ont pas encore donné lieu à des recherches théoriques.

M. Pierre Weiss a, toutefois, étudié ces alliages au point de vue du magnétisme (Thèse de Doctorat ès Sciences, Paris, 1896).

Il les a préparés en fondant ensemble au creuset des quantités convenables des deux métaux. L'antimoine fond d'abord et dissout le fer en donnant un alliage d'autant moins fusible qu'il est plus riche en fer.

Voici les renseignements que donne M. P. Weiss sur les alliages obtenus :

	Fer 0/0
Cristallisé, fibreux, compact, cassant	26,0
Poreux et cassant	29,8
Cristallisé et compact	33,9
Cristallisés, assez compacts, onctueux, tachant le papier comme le graphite, très fragiles	37,3 38,6
Poreux, grossièrement cristallisé	42,7
Assez grossièrement cristallisé, quelques petites souf-flures	45,2
Structure fine, cassure ressemblant à celle de l'acier, plus tenaces que les précédents	51,2 54,4 56,8

Tous ces produits sont très fragiles.

M. Pierre Weiss s'est proposé d'établir une transition entre les corps peu magnétiques et ceux très magnétiques ; on sait que M. Pierre Curie avait d'ailleurs montré que cette transition existe dans le fer, lorsque l'on fait varier la température.

Il était déjà établi que la plupart des corps peu magnétiques et diamagnétiques prennent une aimantation proportionnelle au champ et sont dépourvus d'aimantation résiduelle, tandis que les corps très magnétiques s'écartent de l'aimantation proportionnelle au champ, tant par une loi d'aimantation curviligne que par les phénomènes résiduels.

Les déterminations faites par M. P. Weiss ont donné des résultats très intéressants. L'un des alliages étudiés, qui renferme 38,6 0/0 de fer, a montré la curieuse propriété d'être complètement dépourvu d'aimantation résiduelle, tout en ne s'aimantant pas proportionnellement au champ.

A signaler enfin l'alliage dit de Réaumur renfermant 50 0/0 d'antimoine et 50 0/0 de fer, qui donne des étincelles très régulières sous un choc.

ALLIAGES DE FER ET DE ZINC

Les alliages de fer et de zinc présentent un certain intérêt au point de vue industriel : ils permettent en effet d'introduire le fer dans les laitons et sont utilisés dans la fabrication de certains alliages, tels que le métal Delta. Toutefois, comme nous le verrons plus loin en détails, les laitons au fer seul sont peu usités et on emploie surtout des laitons renfermant en même temps du fer, du manganèse, etc. Dans ces conditions, le fer est introduit parfois sous la forme de ferro-cupro-manganèse.

On peut faire absorber au zinc fondu jusqu'à 8 0/0 de fer ; au-delà de cette limite le fer se sépare. Il est même très difficile d'obtenir des alliages homogènes renfermant plus de 4 à 5 0/0 de fer[1].

1. Un brevet a été pris pour cette fabrication des alliages fer-zinc par la société fabriquant le métal Delta.

Ces alliages sont très fragiles; ils ont une cassure très cristalline.

La micrographie d'un alliage à 4 0/0 Fe indique des cristaux du composé $Zn^{10}Fe$ entourés d'un eutectique (Phot. 145, Pl. XXXVII).

Enfin, il est bon d'ajouter que, dans la galvanisation, il se dépose de très gros cristaux d'alliage zinc-fer. M. Le Chatelier, qui a examiné ces cristaux, croit au composé défini $Zn^{10}Fe$.

ALLIAGES DE FER ET DE PHOSPHORE

Ces alliages ont été étudiés d'une façon très détaillée par M. Stead.

Les recherches de MM. Carnot et Goutal ont permis aussi d'éclaircir le problème de leur constitution.

Des travaux de M. Stead il découle que :

1° Les produits renfermant moins de 1,70 0/0 de phosphore contiennent le phosphore à l'état de phosphure de fer Fe^3P, qui se trouve dissous dans l'excès de fer.

La solution serait saturée à 1,70 0/0 de phosphore.

Le composé Fe^3P a, d'ailleurs, été signalé par Léopold Schneider, Schrötter, Hvoslef et Percy. Il a été isolé aussi par MM. Carnot et Goutal. M. Stead a montré, en outre, que, pour tous les aciers renfermant moins de 1,70 0/0 de phosphore, la structure affecte la forme bien connue de grains polygonaux; de plus, les conditions d'échauffement et de refroidissement étant les mêmes, la dimension des grains s'accroît avec la teneur en phosphore.

2° Les métaux renfermant plus de 1,70 0/0 de phosphore et moins de 10,20 0/0 sont formés de la solution fer-phosphure de fer et d'un eutectique formé par la combinaison Fe^3P et de la solution fer-phosphure de fer.

Cet eutectique (Phot. 147, Pl. XXXVII) renferme environ

61 0/0 du phosphure et 39 0/0 de la solution saturée de phosphure de fer dans le fer.

L'eutectique, se solidifiant le dernier, est en quelque sorte repoussé par les grains cristallins en formation; finalement il les englobe en formant autour d'eux des cloisons cellulaires.

3° Les métaux renfermant de 10,2 à 15,58 0/0 de phosphore sont formés de cristaux du composé Fe^3P et de l'eutectique que nous venons de définir (Phot. 148, Pl. XXXVII).

Plus le phosphore est abondant, plus le composé Fe^3P est important.

Pour 15,58 de phosphore, les cristaux de cette combinaison composent exclusivement la masse devenue homogène.

4° Les alliages renfermant de 15,58 à 21,61 0/0 de phosphore, on trouve deux constituants distincts; en chauffant le métal poli jusqu'au bleu à peine visible, on voit au microscope deux parties diversement colorées: l'une bleue plus oxydée, l'autre d'apparence jaunâtre; chaque constituant est bien homogène.

L'un d'eux, celui qui est coloré en bleu par la chaleur, est attaqué par l'eau régale; l'aimant l'attire : c'est le composé Fe^3P.

L'autre résiste aux acides; il est très peu magnétique : c'est le composé Fe^2P.

5° Les alliages contenant de 21,68 à 24 0/0 de phosphore sont formés de deux constituants dont Fe^2P; l'autre n'a pu être déterminé.

D'autre part, M. Stead a étudié l'influence du carbone sur les alliages de fer et de phosphore. Il est arrivé aux conclusions suivantes :

1° Si l'on fond du phosphure de fer dans le fer en présence de carbone, ce dernier détermine la séparation du phosphure, lorsque le métal se solidifie. S'il y a peu de carbone, ce phosphure figure dans le métal comme eutectique et forme autour des grains cristallins des enveloppes dont l'épaisseur croît avec la teneur en carbone.

Toutefois, cet élément est incapable de faire sortir de solu-

tion la totalité du phosphure, même lorsque la teneur de phosphore s'élève à 3,5 0/0.

Un résidu de phosphure reste toujours en solution ; mais il est très petit, si la proportion de carbone est à son maximum.

2° Le résidu de phosphure semble être retenu par la perlite ; si le phosphore est abondant, il peut s'élever à 0,60 0/0 dans le cas d'un refroidissement très lent ou à 0,75 dans le cas d'un refroidissement plus rapide ;

3° Lorsque la teneur en carbone des aciers dépasse 0,9 0/0, une portion du phosphure de fer correspondant à 0,10 0/0 de phosphore se sépare de la solution ; ce phosphure forme alors autour des grains cristallins des enveloppes fragiles, ce qui rend la masse plus ou moins cassante ; dans ce cas, la solution solide renferme encore plus de phosphore qu'il ne s'en est séparé ;

4° Quand le fer phosphoré est soumis à la cémentation, le carbone commence par séparer le phosphure, et cet effet se continue jusqu'à ce que la solution renferme 0,6 0/0 de phosphore et 1,3 0/0 de carbone.

Si, au début, le fer ne renferme qu'environ 0,6 0/0 de phosphore, le phosphure ne commence à se séparer de la solution qu'au moment où la teneur en carbone, en augmentant, dépasse 1,2 0/0. Ce résultat est donc très différent de celui qu'on obtient en fondant ensemble, puis en laissant se solidifier des lingots ayant des compositions analogues ;

5° Pendant la cémentation, après que l'eutectique phosphoreux s'est séparé sous l'influence du carbone absorbé, une grande partie de ce constituant s'écoule hors de la masse métallique et se répand à l'état liquide dans le charbon environnant ;

6° Si l'on étudie l'échauffement ou le refroidissement des solutions de phosphure dans le fer, on n'observe pas de point critique A_3 et la structure du métal n'est pas changée, même si la température du métal dépasse 1.000° ; cette température élevée ne produit donc aucun changement allotropique ; mais,

si le carbone pénètre dans la masse (cémentation), une forte proportion de phosphure se sépare, et le carbone absorbé détermine la transformation du fer à la température du four à cémenter;

7° La quantité de carbone qu'un métal phosphoré peut absorber dans le haut-fourneau ou le creuset dépend de la proportion de phosphure de fer qu'il contient; le fer pur sans phosphure se combine à 5 0/0 de carbone environ.

Quand le métal est exclusivement formé de phosphure de fer Fe^3P, le carbone n'y pénètre pas d'une façon générale; la quantité de carbone que peut absorber un métal intermédiaire est à peu près en raison inverse de la proportion de Fe^3P qui s'y trouve;

8° Il ne paraît pas que le phosphore détermine la séparation du graphite dans les métaux très carburés, ni qu'il ait pour effet, au contraire, de retenir dans ce métal le carbone à l'état combiné; en somme, à ce point de vue, le phosphore paraît absolument inactif;

9° Si l'on dissout dans l'acide sulfurique ou l'acide chlorhydrique du fer à 1,7 0/0 de phosphore, dans lequel le microscope ne décèle aucune trace de phosphure libre, on obtient un résidu lourd, insoluble, non magnétique et de composition très complexe; ce n'est pas un composé défini de fer et de phosphore, mais plutôt un produit de décomposition du phosphure de fer. On obtient d'ailleurs une substance analogue en faisant réagir les mêmes acides sur le phosphure pur Fe^3P.

MM. Carnot et Goutal ont pu en attaquant une fonte phosphoreuse par du chlorure double de cuivre et de potassium absolument neutre, isoler tout le phosphore sous forme de phosphure de fer, mêlé parfois à une très petite quantité de phosphure de manganèse, en même temps que de silice, d'hydroxyde de silicium, de carbone et de sulfure de cuivre. MM. Carnot et Goutal ont été conduits, par un grand nombre d'analyses, à donner aussi à ce phosphure de fer la formule Fe^3P.

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE VI

Ball and Wingham, *Journal of the Iron and Steel Institute*, 1889, I, p. 123 (*Fer et cuivre*).

Bellings, *Dingl. polyt. Journ.*, t. CCXXVIII, p. 427 (*Divers*).

Biewend, *Journal prakt. Chemie*, XXIII, 252, 1841 (*Fer et plomb*).

Carnot et Goutal, *Comptes Rendus*, 19 juillet 1897 et 9 juillet 1900 (*Fer et phosphore*) ; — *Contribution à l'étude des Alliages métalliques*, p. 501 (*Id.*).

Choubley, *Stahl und Eisen*, 1884, p. 374 (*Fer et cuivre.*)

Guettier, *Guide pratique des Alliages métalliques* (*Fer et étain ; fer et plomb*).

Guillet, *Revue de Métallurgie*, 1904, p.500 (*Fer et étain*).

Held, *Journal prakt. Chemie*, XC, 277, 1863 (*Fer et plomb*).

Lipin, *Stahl und Eisen*, 1900, p. 536 (*Fer et cuivre*).

Ruhfus, *Stahl und Eisen*, 1900, p. 691 (*Id.*).

Sonnenschein, *Journal prakt. Chem.*, 67-168-1856 (*Fer et plomb*).

Stead, *Bulletin de la Société d'Encouragement*, février 1902 (*Fer et cuivre*) ; — *Engineering*, 20 décembre 1901 (*Id.*) ; — *Iron and Steel Institute*, 1901, I, p. 59 (*Id.*); — 1901, II, p. 101 (*Id.*) ; — *Iron and Steel Institute*, septembre 1900 (*Fer et phosphore*) ; — *Engineering*, 19 octobre 1900 (*Id.*).

Weiss, Thèse de doctorat, Georges Carré, éditeur, 1896 (*Fer et antimoine*).

Zugger, *Stahl und Eisen*, 1901, p. 400 (*Fer et zinc*).

CHAPITRE VII

ALLIAGES DE CUIVRE ET D'ÉTAIN
BRONZES ORDINAIRES

I. — ÉTUDE THÉORIQUE

Courbes de fusibilité et courbes de refroidissement. — La courbe de fusibilité des alliages étain-cuivre a été étudiée pour la première fois par M. H. Le Chatelier. — On y note trois branches se raccordant en deux points anguleux correspondant aux alliages à 3 et 72 0/0 de cuivre. La branche intermédiaire, bien que ne présentant pas de maximum bien net, semble cependant indiquer le composé $SnCu^3$.

D'autre part, Roberts-Austen et le Dr Stansfield, étudiant le refroidissement des alliages cuivre-étain, démontrèrent, en 1895, qu'il se produit des dégagements importants de chaleur bien au-dessous du point de solidification totale.

Dans les alliages contenant plus de 75 0/0 de cuivre, ces savants ont trouvé, en dehors du point de solidification commençante, un dégagement de chaleur à 770° et parfois un autre fait analogue entre 500 et 600°.

Les alliages riches en étain donnent un dégagement de chaleur aux environs de 227°.

Enfin MM. Heycock et Neville, qui, comme nous le verrons, ont travaillé tout spécialement cette importante question des alliages cuivre-étain, ont publié un remarquable mémoire qui semble la mettre complètement au point.

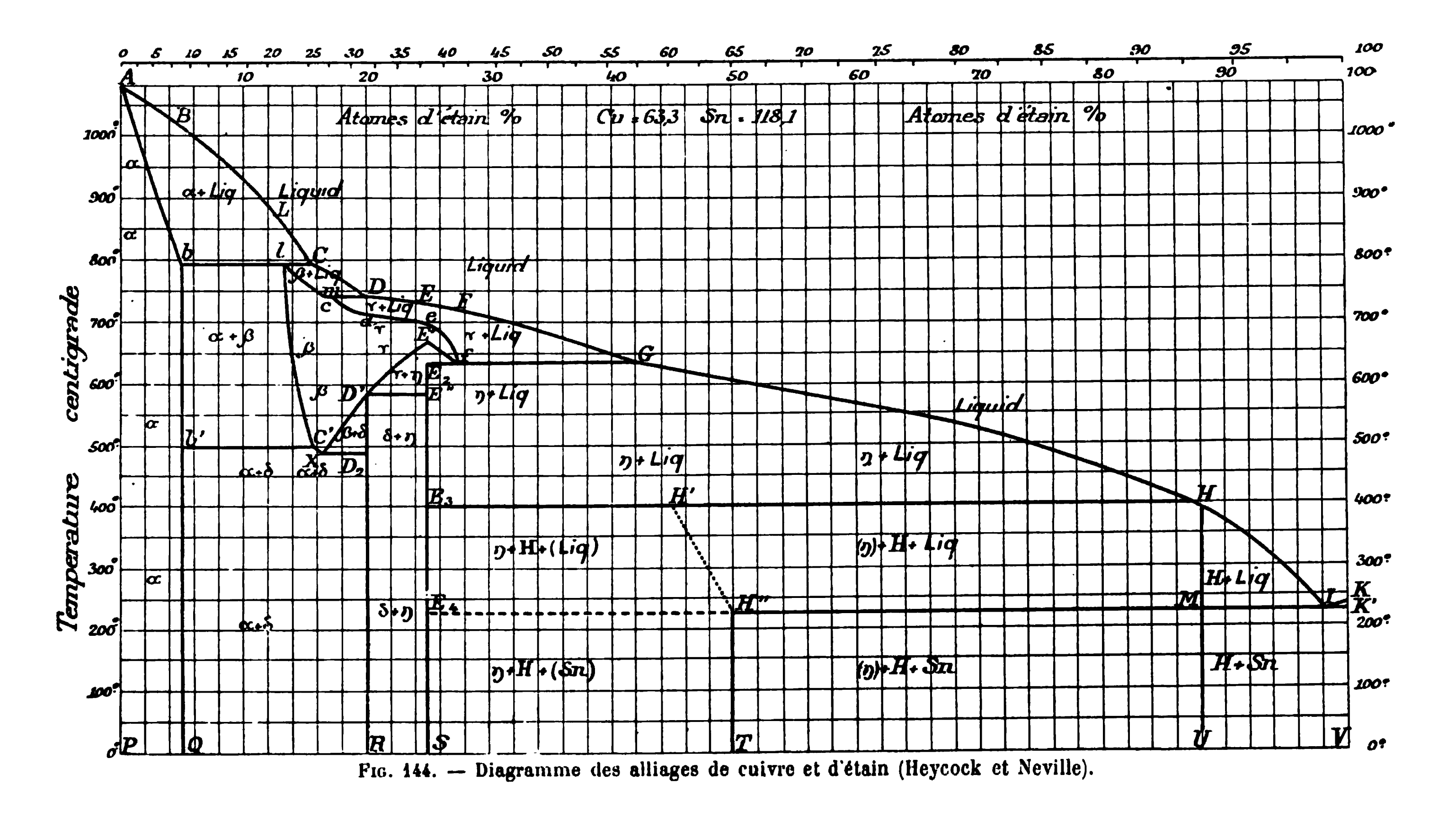


Fig. 144. — Diagramme des alliages de cuivre et d'étain (Heycock et Neville).

En étudiant les courbes de refroidissement des différents alliages, MM. Heycock et Neville ont reconnu qu'elles offraient toutes un palier extrêmement net, indiquant le commencement de la solidification et enfin, au-dessous du point de solidification totale, des dégagements de chaleur qui sont parfois importants.

Réunissant tous les résultats obtenus sur un seul diagramme, MM. Heycock et Neville sont arrivés à la figure 144, que l'on doit interpréter comme suit :

La courbe ABLCDEFGHIK représente les points de solidification commençante. Elle est formée de six branches partant des points A, C, D, G et I.

L'existence de ces six branches démontre d'ores et déjà l'existence de six constituants. Il est bien évident qu'au-dessus de cette courbe on est en présence d'un liquide homogène, immédiatement au-dessous d'un liquide mélangé de solide.

Pour déterminer la courbe de fin de solidification, on a utilisé la métallographie microscopique dans les conditions que nous étudierons ultérieurement. On a obtenu ainsi la ligne brisée $A\,blcmdef\,E_2E_3H'H''K'$.

Les courbes de refroidissement et l'étude micrographique ont permis de diviser le plan en différentes régions indiquées sur le diagramme.

Les phases qui en constituent les différentes portions sont au nombre de sept :

1° La phase liquide que l'on trouve toujours entre la courbe de première solidification et la courbe de seconde solidification ;

2° Les cristaux α formés par des solutions solides isomorphes avec le cuivre pur et renfermant de 0 à 9 0/0 d'étain ;

3° Les cristaux β constitués par des solutions solides renfermant de 22,5 à 27 0/0 d'étain. MM. Heycock et Neville semblent avoir bien établi qu'il n'existe aucune solution homogène qui renferme des proportions d'étain intermédiaires entre 9 et 22,5 ;

4° Les cristaux γ qui paraissent présenter une forme cris-

talline différente des solutions précédentes et dont la composition varie de 28 à 37 0/0 d'étain;

5° Un corps δ qui possède une structure cristallisée très nette. Ce peut être une solution solide de composition variable; mais on est plutôt porté à voir, en ces cristaux, la combinaison Cu^4Sn[1].

6° Le corps η que l'on peut isoler aisément; c'est le composé Cu^3Sn.

7° La substance H qui pourrait être regardée comme la combinaison CuSn; mais il est à noter que sa composition, qui est constante, annonce toujours un pourcentage de cuivre un peu plus élevé que celui correspondant à cette combinaison. Peut-être serait-ce le composé CuSn renfermant en solution solide une très faible quantité de Cu^3Sn

Métallographie (Album, Pl. XXXIX à XLVI). — C'est la métallographie microscopique qui nous permettra d'être fixés sur les différents constituants que nous venons d'énumérer.

Mais peut-être n'est-il pas inutile d'examiner les travaux micrographiques antérieurs à ceux d'Heycock et Neville. Ils sont dus à MM. Behrens, Charpy et Campbell.

Les conclusions des études de M. Behrens furent les suivantes :

1° Les alliages contenant de 2 à 6 0/0 d'étain sont constitués par un réseau de fils jaunâtres enchâssés dans un métal de couleur rouge;

2° Les alliages renfermant de 8 à 15 0/0 d'étain contiennent des groupes dendritiques et cruciformes de cristaux cubiques possédant une couleur qui varie de l'orange au jaune. Ces cristaux sont noyés dans une pâte homogène de couleur jaune clair.

3° Les produits qui contiennent de 15 à 20 0/0 d'étain sont constitués par des cristaux jaune clair qui sont situés suivant des lignes se croisant les unes et les autres à angles droits. Ils sont enchâssés dans une pâte blanche qui est plus dure que les cristaux.

1. Voir à l'*Appendice*.

M. Charpy a démontré les différents points suivants :

1° Tous les alliages qui contiennent moins de 25 0/0 d'étain sont constitués par deux éléments, l'un de couleur jaune rouge, l'autre sensiblement blanc.

Pour mettre ces deux éléments en vue, il suffit d'attaquer légèrement à l'acide chlorhydrique et de donner ensuite un très faible polissage.

Pour les alliages contenant de 18 à 25 0/0 d'étain, un simple polissage différencie les deux éléments.

Ces dendrites présentent l'aspect spécial des eutectiques (lamelles alternantes). Elles seraient constituées par le premier eutectique.

2° Les alliages qui renferment de 35 à 45 0/0 d'étain possèdent une structure sensiblement homogène ;

3° Les alliages de 10 à 33 0/0 de cuivre montrent des cristaux extrêmement durs de forme aciculaire, mais qui n'ont pas toujours des contours très réguliers ;

4° Enfin, M. Charpy montra qu'un refroidissement plus ou moins rapide avait de l'influence sur la constitution des alliages cuivre-étain.

M. Stead étudia plus spécialement les alliages à basse teneur en cuivre.

Il montra que, dès que l'étain contient 0,1 0/0 de cuivre, on peut déceler de très fines aiguilles dont les dimensions augmentent avec le pourcentage de cuivre. A 10 0/0 de cuivre, on obtient des cristaux très mal formés affectant la forme de lances, aux extrémités desquelles on trouve de très petits cristaux.

M. Campbell (*Engineering*, janvier 1902, p. 28) a donné une étude d'ensemble très intéressante ; en voici les principales conclusions :

1° A 1 0/0 de cuivre, on obtient le premier alliage eutectique ;

2° De 0 à 1 0/0 de cuivre, l'étain cristallise en gros grains ou en dendrites qui sont, bien entendu, englobés dans l'eutectique ;

3° De 1 à 8 0/0 de cuivre, on trouve des aiguilles très brillantes qui augmentent avec le pourcentage de cuivre;

4° De 8 à 41 0/0, on est en présence d'un autre constituant qui se présente en petits cristaux qui s'oxydent très rapidement;

5° De 41 à 61 0/0 de cuivre, on obtient des bâtonnets qui semblent bien être le composé $SnCu^3$ et qui sont entourés d'un eutectique. A 5 0/0, l'eutectique disparaît. A 61,7 0/0, on a une masse homogène;

7° De 68,28 à 74 0/0 de cuivre, on trouve le second eutectique entourant les cristaux brillants de $SnCu^4$.

8° Les alliages dont la teneur en cuivre dépasse 75 0/0 montrent un nouveau constituant se présentant en grains jaunes ; la couleur passe du jaune au rouge, lorsque la teneur en cuivre augmente, et les grains vont en augmentant. Ceci prouve que ces grains sont formés de cuivre contenant de l'étain en solution. L'eutectique va en diminuant, tandis que le pourcentage de cuivre croît.

On voit que dans ces études il n'est pas question de l'influence du traitement, et que, l'importante remarque de M. Charpy mise à part, les savants dont nous venons d'analyser les travaux n'ont pas examiné les effets de la trempe. Il nous faut, pour étudier ce point, approfondir les travaux de MM. Heycock et Neville (*Philosophical Transactions of the Royal Society*, janvier 1904).

Dans l'importante et récente étude de ces savants, la question de la constitution des bronzes est très précisée; il semble même qu'elle est absolument mise au point. Nous définirons les conditions de formation et les caractéristiques des différents constituants reconnus par M. Heycock et Neville et que nous avons déjà énumérés.

1° *Constituant* α (Phot. 153 à 155, Pl. XXXIX et Phot. 163, Pl. XLI). — Le constituant α est toujours plus facilement oxydé que la matière environnante. L'ammoniaque ou l'acide chlorhydrique attaque l'α en le noircissant et laisse très blanche la partie riche en étain. La solution de chlorure ferrique dans l'acide chlorhydrique a sensiblement même effet.

Mais, lorsqu'on est en présence d'un mélange $\alpha + \beta$, α apparaît en plus pâle que β, cette dernière substance restant le plus souvent très sombre.

Le *constituant* α montre un noyau différant quelque peu de la partie extérieure. Ces noyaux s'oxydent plus facilement que la matière extérieure, et ils sont plus rapidement attaqués et brunis par des réactifs, tels que l'ammoniaque. Ils sont donc plus riches en cuivre que les parties extérieures des cristaux.

On le rencontre dans tous les alliages contenant de 0 à 8 0/0 d'étain. Quand on trempe à des températures de 1.025°, 970° et 850°, on obtient des figures dans lesquelles le corps α qui apparaît en noir est d'autant plus abondant que la température de trempe est plus basse (Phot. 154, Pl. XXXIX).

A 800°, température qui est un peu au-dessous de la courbe de fin de solidification, on a le constituant α homogène (Phot. 155, Pl. XXXIX).

2° *Constituant* β. — Ce constituant est toujours bien plus riche en étain que le constituant α. Lorsque les deux constituants se trouvent en présence, on peut aisément les distinguer : α s'oxyde le premier ; l'ammoniaque fort ternit d'abord α, tandis que β reste très blanc. L'attaque par le chlorure ferrique en solution chlorhydrique est très lente. L'apparence de ce constituant est la même que celle du corps α. La photographie 156 (Pl. XXXIX), montre le résultat obtenu en trempant l'alliage contenant 25,5 0/0 d'étain à la température de 750°. En trempant à une température inférieure au solidus, on obtient le corps β homogène. Ce résultat est obtenu avec tous les alliages renfermant de 26 à 32 0/0 d'étain.

Le chlorure ferrique permet, comme nous l'avons dit, de différencier α et β.

3° *Constituant* γ. — Ce constituant formé, comme les précédents, par une solution cuivre-étain, s'attaque avec une très grande difficulté par le réactif ci-dessus indiqué.

Dans la micrographie 157 (Pl. XL), qui représente le métal à 47,9 0/0 d'étain trempé à 676°, on voit le constituant γ

en cristaux blancs. La partie fine qui les environne est formée par le liquide rapidement solidifié.

L'oxydation à chaud n'agit pas sur ce constituant.

Mais l'acide chlorhydrique assombrit le fond, tandis que γ reste intact.

4° *Constituant* δ. — Il semble correspondre au composé Cu^4Sn et peut être caractérisé au moyen de l'acide chlorhydrique qui noircit α, mais n'a pas d'action sur δ.

On le distingue aisément du composé η, qui n'est autre chose que Cu^3Sn.

En effet δ se colore en brun par oxydation, η reste blanc ; le chlorure ferrique en solution chlorhydrique laisse δ intact, tandis qu'il noircit η. La micrographie 161 (Pl. XLI) représente l'alliage à 27,6 0/0 d'étain trempé à 450°. La micrographie 160 donne la structure de l'alliage à 33,15 0/0 d'étain, trempé à 590°.

5° *Constituant* η. — L'ammoniaque est sans action sur ce constituant. C'est le composé $SnCu^3$; nous venons d'en indiquer les caractéristiques. En le chauffant pendant fort longtemps à température convenable, on développe considérablement les cristaux. Les micrographies 158 et 159 (Pl. XL) donnent les images d'un bronze à 57,5 d'étain trempé à 600° et du même alliage chauffé à 445° pendant soixante-dix heures.

6° *Constituant* H (Phot. 162, Pl. XLI). — Il diffère peu, nous l'avons dit, du composé SnCu ; il se forme très difficilement et seulement dans un refroidissement extrêmement lent. Quand on refroidit un alliage qui, par sa composition, devrait donner le composé SnCu, c'est-à-dire le constituant H, on obtient le constituant η, c'est-à-dire le composé $SnCu^3$. Ce constituant résiste à l'action de l'acide chlorhydrique même très concentré et au mélange de cet acide au chlorure ferrique. Il résiste aussi à l'oxydation lente de l'air beaucoup mieux que η.

Transformations de ces différents constituants. — 1° *Transformation du constituant* α. — Pour les alliages contenant moins de 7 0/0 d'étain, le constituant ne subit pas de transformation. Il est stable à la température ordinaire. Toutefois, la structure subit quelque variation avec la vitesse de refroidis-

sement. Au commencement de la solidification, les cristaux sont plus riches en cuivre, et le liquide moins riche en ce métal que la masse. Mais, au fur et à mesure que la solidification avance, les cristaux qui prennent naissance dans un liquide de plus en plus riche en étain s'enrichissent sur les bords en ce métal. Cette structure apparaît dans la photographie 163 (Pl. XLI), donnée par un alliage à 7,2 0/0 d'étain trempé à 800°. Si on laisse refroidir l'alliage lentement, il y a diffusion de l'étain et les cristaux deviennent homogènes.

Quand la teneur en étain dépasse la proportion de 7 0/0, le constituant α se transforme pendant le refroidissement et donne naissance au constituant β. Si l'on considère l'alliage à 15,6 0/0 d'étain et si on le trempe à 880°, c'est-à-dire au-dessus du point de fin de solidification, on obtient des cristaux de α entourés d'une matière à grains extrêmement fins provenant d'une solidification brusque de la partie encore liquide à la température de 880° (Phot. 164, Pl. XLI).

Si l'on trempe le même alliage à une température de 770° et, par conséquent, après la fin de solidification, on reconnaît que le constituant α n'a pas augmenté et on trouve des cristaux β qui commencent à prendre naissance.

A une température basse, il y a dissolution du corps α dans le corps β, et celui-ci va en diminuant.

Pour des alliages renfermant plus de 26 0/0 d'étain, le constituant α ne se forme pas.

Transformations du constituant β. — Si on laisse refroidir l'alliage à 15,6 0/0 d'étain formé par le mélange $\alpha + \beta$ à 770°, on voit que le constituant β se transforme en se dédoublant en α et δ. On obtient alors un alliage formé du composé α, qui apparaît en noir, et d'un complexe formé de $\alpha + \delta$: ce complexe étant plus difficile à attaquer que le constituant α, il apparaît en blanc.

La photographie 166 (Pl. XLII) donne le détail du phénomène. On y voit le constituant β qui apparaît en noir uniforme, bordé en blanc par le corps δ ; le reste est constitué par le corps α.

Les photographies 165 et 167 (Pl. XLII) donnent le même alliage

trempé à 470° au lieu de 540°; la transformation est plus accentuée. On trouve d'abord le complexe $\alpha + \delta$ bordé du constituant δ et au dehors le constituant α. Ici on ne rencontre plus du tout le constituant β.

La transformation du constituant β a lieu vers 500° environ. Dans des alliages riches en étain, en renfermant 23 0/0 par exemple, on a, au début, des cristaux de α; ceux-ci disparaissent dans le refroidissement en donnant le constituant β, souvent caractérisé par des stries très nombreuses (Phot. 169, Pl. XLIII). A une plus basse température, le constituant β donne naissance au constituant α (Phot. 170, Pl. XLIII), qui apparaît en blanc sur un fond noir de β non transformé, et enfin on obtient le constituant α qui apparaît en noir, et le complexe $\alpha + \beta$ en blanc (Phot. 171, Pl. XLIII).

Lorsque la teneur en étain est plus grande que celle de l'alliage étudié, il se produit directement le constituant β sans passer par le constituant α. La photographie 172 (Pl. XLIII) donne un alliage à 27,6 0/0 d'étain trempé à 730°.

Un tel alliage donne, en se transformant, des cristaux de δ, sur un fond de $\alpha + \delta$. On obtient ainsi souvent des éléments extrêmement fins $\alpha + \delta$. La photographie 173 (Pl. XLIV) donne un alliage à 29 0/0 d'étain trempé à 500°.

Transformations du constituant γ. — Le constituant γ se trouve en solution solide et homogène dans tous les alliages qui renferment plus de 33 0/0 d'étain. Quand on trempe avant la solidification complète, on obtient la microstructure de la photographie 174 (Pl. XLIV).

Lorsqu'on trempe immédiatement après la solidification complète, on obtient le constituant γ.

Pendant le refroidissement, le corps γ se transforme en donnant le constituant η. La photographie 175 (Pl. XLIV) montre des bandes du constituant η.

Enfin, pour des teneurs encore plus fortes en étain, le constituant η prend naissance directement aux dépens du liquide et peut donner le composé H, si le refroidissement est extrêmement lent; il faut maintenir un certain nombre de jours à

basse température. On a généralement des cristaux de η bordés de H (Phot. 176, Pl. XLIV).

Nous signalerons qu'une attaque au picrate de soude colore nettement en noir le composé Cu^4Sn, ce qui permet de le différencier des autres constituants (Phot. 177, Pl. XLV).

Ce réactif a été employé pour la première fois, dans ce but, au laboratoire des usines de Dion-Bouton, par un de nos collaborateurs, M. Le Grix.

Dilatation. — Crace Calvert a déterminé la dilatation des alliages cuivre-étain. Les résultats sont donnés dans le diagramme (*fig.* 145). On note un maximum qui correspond exactement aux proportions Cu^3Sn. Ceci démontre bien l'existence

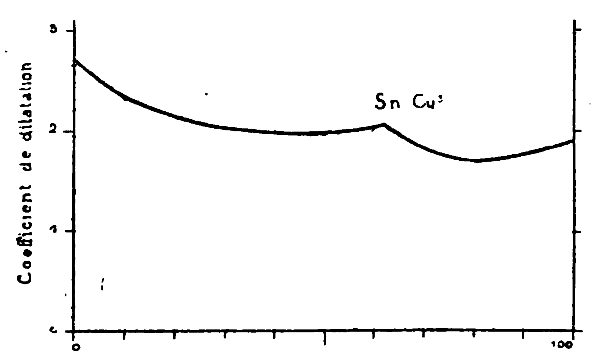


Fig. 145. — Dilatation des alliages étain-cuivre.

de cette combinaison; en effet de simples mélanges d'étain et de cuivre donneraient une courbe continue; l'anomalie trouvée ne peut s'expliquer que par l'existence d'un corps nouveau.

Résistance électrique. — La détermination de la résistance électrique a confirmé également l'existence du composé Cu^3Sn. En effet la conductibilité est donnée par la courbe (*fig.* 146), qui possède un maximum correspondant à la dilatation.

Force électromotrice de dissolution. — Laurie a été le premier qui ait déterminé les forces électromotrices des

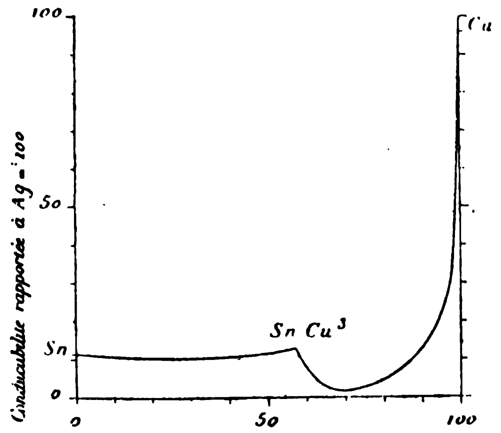


Fig. 146. — Résistance électrique des alliages cuivre-étain.

alliages cuivre-étain; il a pu ainsi établir d'une façon certaine l'existence de la combinaison Cu^3Sn.

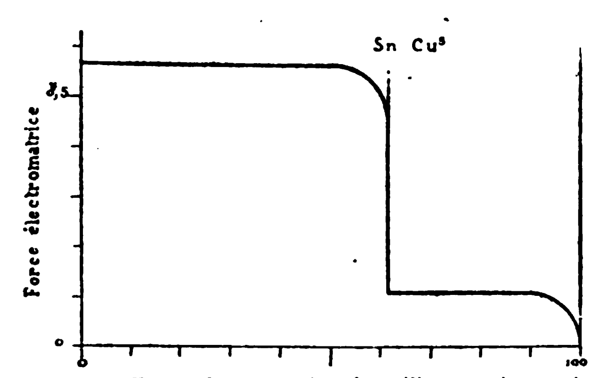


Fig. 147. — Force électromotrice des alliages cuivre-étain.

Ces expériences ont été reprises depuis par Herschkowitsch, qui, comme nous l'avons montré dans le premier volume[1], a obtenu des résultats semblables (*fig.* 147).

1. Guillet, *les Alliages métalliques. Étude théorique des alliages métalliques*, p. 198.

Densité. — Nous avons déjà examiné les nombreuses causes qui peuvent influencer la densité d'un métal[1]. Les expériences qui ont été faites, par M. Riche, sur la limaille des alliages cuivre-étain, montrent, malgré les écarts donnés par d'autres expériences sur le même produit, qu'il existe bien une combinaison Cu^3Sn. En effet, sur la courbe de la figure 148, on voit bien que la densité des alliages compris entre le cuivre pur et la combinaison Cu^3Sn reste à peu près constante. Elle va ensuite en décroissant lorsque l'étain augmente. Pour expliquer ces résultats, il est nécessaire d'admettre l'existence de la combinaison Cu^3Sn ayant la même densité que le cuivre.

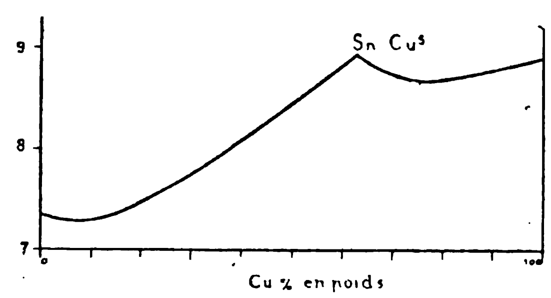


Fig. 148. — Densités des alliages cuivre-étain.

Propriétés mécaniques. — L'une des propriétés mécaniques, qui a été le plus étudiée, pour les alliages cuivre-étain est assurément la dureté. Les principales expériences sont dues à Crace Calvert, qui opéra de la façon suivante : il mesurait l'effort nécessaire pour qu'un poinçon, de forme et de qualité parfaitement déterminées, s'enfonçât d'une quantité donnée dans l'alliage à essayer. On a, d'une part, déterminé par expérience la dureté de l'alliage en prenant comme terme de comparaison la fonte grise pour laquelle l'effort est supposé égal à 1.000 et, d'autre part, calculé l'effort nécessaire d'après la loi des mélanges, c'est-à-dire en supposant l'alliage formé de cuivre et d'étain et ne contenant pas de combinaison.

1. Guillet, *les Alliages métalliques. Etude théorique*, p. 196.

Voici les résultats obtenus :

COMPOSITION DE L'ALLIAGE	DURETÉ OBSERVÉE	DURETÉ CALCULÉE
$CuSn^5$	83	51
$CuSn^3$	104	68
$CuSn^2$	135	85
$Cu^{10}Sn$	916	257
$Cu^{15}Sn$	772	270
$Cu^{25}Sn$	602	279

On voit qu'il n'y a aucune concordance entre les duretés observées et les duretés calculées. Mais, si l'on cherche à faire coïncider le calcul et l'expérience, on voit qu'on y arrive en admettant la combinaison Cu^3Sn possédant une dureté égale à 1.500.

Les autres propriétés mécaniques, qui ont surtout un intérêt industriel, seront étudiées plus loin.

Étude chimique. — L'étude chimique des alliages cuivre-étain permet aussi d'éclaircir l'important problème de leur constitution.

Si on considère ceux de ces alliages qui sont riches en étain, on peut les traiter par l'acide chlorhydrique concentré et obtenir un résidu qui correspond exactement à la formule Cu^3Sn.

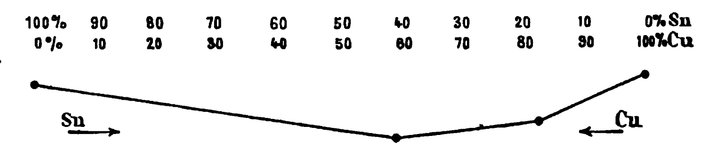


FIG. 149. — Chaleur de formation des alliages cuivre-étain.

Chaleur de formation. — On sait[1] que M. Herschkowitsch a étudié la chaleur de formation des alliages cuivre-étain et qu'il a noté un minimum correspondant à la formule Cu^3Sn (*fig.* 149).

1. L. Guillet, *les Alliages métalliques. Étude théorique*, Vve Dunod, éditeur.

Résumé. — On ne saurait douter de l'existence de la combinaison Cu^3Sn qui est mise en vue :

1° Par la dilatation ;

2° Par la résistance électrique ;

3° Par la force électromotrice de dissolution ;

4° Par la densité ;

5° Par les propriétés mécaniques ;

6° Par l'étude chimique ;

7° Par la chaleur de formation.

8° Par la micrographie.

D'autre part, l'importante étude de MM. Heycock et Neville, qui paraît avoir mis définitivement au point la question de la constitution des alliages cuivre-étain, établit l'existence de trois espèces de solution, que nous avons définies précédemment, α, β, γ, ainsi que de trois combinaisons probables : $\delta = Cu^4Sn$; $\eta = Cu^3Sn$; $H = CuSn$.

Toutefois, l'existence de δ n'est peut-être pas suffisamment prouvée. Quant à H, ce serait plus exactement le composé CuSn ayant dissous un peu du composé Cu^2Sn.

La solution α, les combinaisons δ, Cu^3Sn et H sont stables aux températures ordinaires. Les solutions β et γ, au contraire, ne sont pas stables aux températures basses ; on ne peut les observer que dans les métaux trempés dans certaines conditions[1].

Enfin, il faut bien faire observer, avec M. Guillemin, que la micrographie donne des indications précieuses sur le travail qu'a subi le métal, s'il a été coulé à trop haute ou à trop basse température, s'il a été refroidi brusquement ou lentement, s'il a été laminé, estampé, martelé, etc.

II. — ÉTUDE INDUSTRIELLE

FABRICATION

La fabrication des bronzes comprend :

1° La fusion ;

2° La coulée ;

1. Voir à l'*Appendice* les remarques de M. Shepherd.

3° La préparation du métal pour l'amener sous la forme commerciale voulue.

Disons de suite que la plus grande quantité de bronze est préparée sous forme de pièces moulées.

On peut utiliser comme matières premières des métaux purs; mais, généralement, on y ajoute de vieux bronzes (masselottes, tournures, etc...). Ceux-ci peuvent d'ailleurs être traités préalablement en vue d'obtenir une composition déterminée et n'avoir besoin que d'une refonte; cette industrie de l'utilisation de vieux bronzes est particulièrement intéressante en France, où l'on utilise le water-jaquet ou un petit cubilot pour traiter ces matières et obtenir des bronzes au titre. On cherche notamment à acheter des produits très bon marché, tels que les bronzes très chargés en zinc, et l'on fait évaporer ce dernier.

Quoi qu'il en soit des matières premières, les bronzes sont obtenus ordinairement par fusion dans des creusets ou dans les fours à réverbère, lorsqu'il est nécessaire d'avoir en même temps une quantité importante de métal fondu.

Nous avons d'ailleurs donné dans le premier chapitre des détails sur les fours employés.

On fond d'abord le cuivre, on ajoute ensuite les déchets, et ce n'est qu'à la fin que l'on ajoute l'étain.

Il est fort important de fondre le cuivre le plus rapidement possible pour éviter son oxydation.

Nous ne parlons pas ici des autres produits qui peuvent intervenir, n'envisageant que les alliages cuivre-étain.

Souvent on a soin de chauffer l'étain à une température très voisine de son point de fusion, avant de l'introduire dans le cuivre fondu, ceci afin d'éviter un refroidissement trop grand de ce dernier.

Il est nécessaire d'empêcher le métal de s'oxyder pendant la fusion : à cet effet, on recouvre la surface du métal de petits morceaux de coke ou d'anthracite en poussière. On évite aussi de cette façon que les gaz de l'atmosphère ou du foyer se dissolvent dans le métal, ce qui peut occasionner des soufflures

dans la coulée. Dans le cas d'un four à réverbère, on cherche avant tout à créer une atmosphère neutre ou même réductrice.

On peut admettre qu'un bon creuset fait, avec un bronze de composition moyenne, environ de vingt-cinq à trente coulées. Mais cette durée dépend surtout de la conduite du feu.

La coulée du bronze ne présente aucune particularité.

La température de coulée est généralement appréciée par la fluidité de l'alliage.

Le cuivre pur doit être coulé aussi bas que possible.

On peut se proposer soit l'obtention de pièces moulées, soit l'obtention de barres laminées ou étirées.

Dans le premier cas, qui est d'ailleurs le plus fréquent, le moulage relève d'un art spécial, dans les détails duquel nous ne saurions entrer ici ; au sortir du moule, la pièce n'a plus qu'à être ébarbée, brossée, et, s'il y a lieu, polie, ajustée, etc.

On coule parfois le bronze en coquilles. On obtient ainsi de meilleurs résultats avec les alliages contenant peu d'étain (moins de 4 à 5 0/0) qu'en coulant en sable. Pour des alliages riches renfermant plus d'étain, on utilise dans la généralité des cas les moules faits avec cette dernière matière.

Dans le cas de barres (nous verrons plus loin qu'il n'y a que quelques alliages qui peuvent subir les traitements que nécessite cette fabrication) on coule le métal comme il sera indiqué pour les laitons, qui doivent être laminés à froid.

PROPRIÉTÉS

Couleur. — La couleur des alliages cuivre-étain varie du rouge au blanc suivant la composition.

Les alliages qui contiennent de 95 à 100 0/0 de cuivre conservent la couleur rouge du cuivre métallique. De 90 à 95 0/0 de cuivre, la coloration tend vers le jaune or ; elle est fran-

chement or pour les alliages renfermant 85 à 90 0/0 de cuivre; lorsqu'on abaisse la teneur en cuivre, la coloration jaune devient de plus en plus pâle. A partir de 50 0/0, les alliages de cuivre-étain sont blancs.

Traitement mécanique. — Les alliages de cuivre et d'étain offrent généralement une faible malléabilité. Il suffit de petites quantités d'étain introduites dans le cuivre pour modifier considérablement la façon dont il se travaille. Les alliages renfermant au moins 98 0/0 de cuivre se travaillent bien à froid et à chaud ; toutefois, un travail trop brusque (martelage, étirage, etc.), sans action mauvaise sur le cuivre, fera cependant apparaître des criques à la surface de cet alliage, ce qui dénote déjà une grande différence de malléabilité avec le cuivre.

On peut laminer à froid, étirer, des alliages contenant de 90 à 100 0/0 de cuivre[1] ; mais ceux qui contiennent moins de 90 0/0 de cuivre ne supportent guère un travail mécanique.

Toutefois Riche a montré que l'alliage renfermant de 80 à 82 0/0 de cuivre, qui est utilisé pour la confection des tamtams, se travaille au rouge sombre, tandis qu'il crique de la température ordinaire à 300°. Un peu au-dessus du rouge sombre il est presque aussi mou que le plomb. Au rouge cerise, il est aussi cassant qu'à la température ordinaire.

Ceci correspond nettement à la transformation indiquée par MM. Heycock et Neville et peut être généralisé pour toute une catégorie de bronzes.

Le forgeage a sur les bronzes une influence très grande ; il les durcit considérablement ; mais la fragilité est toutefois considérablement accrue.

Propriétés mécaniques. — Les propriétés mécaniques des alliages cuivre-étain ont été étudiées d'une façon systématique ; mais les résultats obtenus ne sont pas toujours concordants. Ceci s'explique fort bien par ce fait que la vitesse de refroidissement

1. Toutefois il faut que l'alliage soit fait en partant de métaux très purs et ne contienne pas d'oxydule ; d'où traitement par le phosphure de cuivre.

a une action extrêmement grande sur les propriétés du métal. Celles-ci dépendent donc non seulement de la composition, mais aussi de la coulée et du moule où elle se fait, de la rapidité avec laquelle on démoule, etc.

Ces irrégularités ont été notamment mises en vue pour les alliages renfermant de 90 à 92 0/0 de cuivre, de 10 à 8 0/0 d'étain qui, nous le verrons, constituent l'ancien métal à canons. Elles s'expliquent d'ailleurs fort bien par le diagramme d'Heycock et Neville, comme nous le verrons plus loin à propos de la trempe.

On peut cependant résumer les principales expériences faites.

Voici, tout d'abord, le tableau établi par la Commission des Alliages pour les États-Unis en 1879.

PROPRIÉTÉS DES

NUMÉROS	FORMULE ATOMIQUE	COMPOSITION ORIGINALE Cu	Sn	COMPOSITION D'APRÈS ANALYSE Cu	Sn	POIDS SPÉCIFIQUE	COULEUR	CASSURE	TÉNACITÉ EN KILOGRAMMES par mm. carré
1	»	100	0	»	»	8.791 *a* 8.874 *b*	rouge cuivre	fibreuse	19,5
2	»	100	0	»	»	8.667	rouge brique	friable	38,7
3	»	100	0	»	»	8.921	»	»	»
4	»	100	0	»	»	»	»	»	»
5	»	100	0	»	»	8.794	»	»	»
6	»	100	0	»	»	8.921	»	»	»
7	»	100	0	»	»	8.952	»	»	»
8	»	100	0	»	»	»	»	»	»
9	»	100	0	»	»	8 672	»	»	17,0
10	»	98,59	1,41	»	»	»	»	»	»
11	$SnCu^{96}$	98,1	1,9	97,89	1,9	8.564	rouge	vésiculaire	»
12	»	98,04	1,96	»	»	»	»	»	»
13	»	98	2	»	»	»	»	»	»
14	»	97,5	2,5	»	»	8.511	rouge	vésiculaire	»
15	»	96,97	3,03	»	»	»	»	»	»
16	$SnCu^{48}$	96,27	3,73	96,06	3,76	8.649	jaune rouge	vésiculaire	22,5
17	»	96	4	»	»	8.947	»	»	»
18	»	95	5	»	»	»	jaune d'or	»	»
19	»	94,1	5,9	»	»	»	»	»	»
20	»	94	6	»	»	8.939	»	»	»
21	»	93,98	6,02	»	»	»	»	»	»
22	$SnCu^{25}$	93,17	6,83	»	»	8.82	»	»	»
23	$SnCu^{24}$	92,8	7,2	»	»	8.694	jaune rougeâtre	vésiculaire	20
24	»	92,5	7,5	»	»	8.684	id.	»	19,6
25	»	92	8	»	»	»	»	»	»
26	»	91,75	8,25	»	»	»	»	»	»
27	»	91,74	8,26	»	»	»	»	»	»
28	»	91,7	8,3	»	»	»	»	»	»
29	»	91,66	8,33	»	»	»	»	»	»
30	$SnCu^{20}$	91,9	8,51	»	»	8.793	»	»	»
31	»	91,3	8,7	»	»	»	»	»	»
32	»	90,91	9,09	»	»	»	»	»	22,6
33	»	90,9	9,1	»	»	»	»	»	»
34	»	90,73	9,27	»	»	»	»	»	»
35	»	90,1	9,9	»	»	»	»	»	»
36	»	90	10	90,27	9,58	8.669	jaune gris	friable	18,9
37	»	90	10	»	»	8.875	»	»	»
38	»	90	10	»	»	8.935	»	»	»

ALLIAGES CUIVRE-ÉTAIN

ORDRE de ductilité MALLET	DUCTILITÉ relative THURSTON	DURETÉ MALLET, CALVERT, JOHNSON	ORDRE de malléabilité MALLET	ORDRE de fusibilité MALLET	CONDUCTIBILITÉ CALORIFIQUE Ag = 100	CONDUCTIBILITÉ ÉLECTRIQUE Ag = 100	AUTORITÉ	REMARQUES
»	30,08	»	»	»	»	»	U. S. B	*a*. Poids spécifique de la barre. *b*. Poids spécifique des rognures du lingot.
1	»	10	2	16	»	»	Ml	»
»	»	»	»	»	»	93,16	Ma	»
»	»	301	»	»	81,1	»	CJ	»
»	»	»	»	»	»	»	Cr	»
»	»	»	»	»	»	»	Mar	Cuivre fondu.
»	»	»	»	»	»	»	Mar	Cuivre en feuilles.
»	»	»	»	»	73,6	79,3	We	
»	»	»	»	»	»	»	Wa	Moyenne de 9 échantillons.
»	100,1	»	»	»	»	62,46	Ma	»
»	»	»	»	»	»		U. S. B	Barre défectueuse.
»	»	»	»	»	»	»	Bo	Peut être forgé comme le cuivre.
»	»	»	»	»	»	»	La	Baguettes de fusil.
»	»	»	»	»	»	»	U. S. B	Barre défectueuse.
»	»	»	»	»	»	»	W	Résiste à l'action de l'acide chlorhydrique.
»	70,3	»	»	»	»	»	U. S. B	»
»	»	»	»	»	»	»	Ri	Recuit et comprimé.
»	»	»	»	»	»	»	W	Dur, malléable.
»	»	»	»	»	»	»	Bo	Pièces de machines.
»	»	»	»	»	»	»	Ri	Poids spécifique après des trempes répétées
»	»	»	»	»	»	19,68	Ma	»
»	»	602,8	»	»	»	»	CJ	»
»	21,9	»	»	»	»	»	U. S. B	»
»	43,2	»	»	»	»	»	U. S. B	»
»	»	»	»	»	»	»	Bo	Bronze pour médailles.
»	»	»	»	»	»	»	W	Montre une séparation si on examine avec une loupe.
»	»	»	»	»	»	»	Bo	Artillerie anglaise.
»	»	»	»	»	»	»	Bo	Métal pour artillerie.
»	»	»	»	»	»	»	Bo	Canons de huit.
»	»	639,58	»	»	»	»	CJ	»
»	»	»	»	»	»	»	Bo	Roues dentées.
»	»	»	»	»	»	»	Mus	Artillerie prussienne.
»	»	»	»	»	»	»	Bo	Métal d'artillerie.
»	»	»	»	»	»	»	Bo	Artillerie française.
»	»	»	»	»	»	»	Bo	»
»	18	»	»	»	»	»	U. S. B	Bronze d'artillerie comprimé.
»	»	»	»	»	»	»	De	Après compressions répétées.
»	»	»	»	»	»	»	Ri	Coussinets de voitures de chemins de fer.

NUMÉROS	FORMULE ATOMIQUE	COMPOSITION ORIGINALE		COMPOSITION D'APRÈS ANALYSE		POIDS SPÉCIFIQUE	COULEUR	CASSURE	TÉNACITÉ EN KILOGRAMMES par mm. carré
		Cu	Sn	Cu	Sn				
39	»	90	10	»	»	»	»	»	»
40	»	89,3	10,7	»	»	»	»	»	»
41	»	89,29	10,71	»	»	8.953	»	»	26,5
42	»	89,29	10,71	»	»	8.313	»	»	18,1
43	»	89,29	10,71	»	»	8.353	»	»	18,3
44	»	89,23	10,77	»	»	»	»	»	»
45	$SnCu^{15}$	89	11	»	»	8.84	»	»	»
46	$SnCu^{15}$	88,97	11,03	»	»	8.825	»	»	»
47	»	88,89	11,11	»	»	8.523	»	»	»
48	»	88,39	11,61	»	»	»	»	»	»
49	»	88	12	»	»	»	»	»	»
50	»	87,65	12,35	»	»	»	»	»	»
51	»	87,5	12,5	»	»	8.648	jaune grisâtre	friable	21,9
52	»	86,8	13,2	»	»	»	»	»	»
53	$SnCu^{12}$	86,57	13,43	87,15	12,73	8.681 *a*	truité	finement vésiculaire	20,7
						8.943 *b*	blanc et jaune		
54	»	86,21	13,79	»	»	8.87	»	»	»
55	»	86	14	»	»	»	»	»	»
56	»	85,71	14,29	»	»	»	»	»	31,0
57	»	85,09	14,91	»	»	»	»	»	»
58	$SnCu^{10}$	84,33	15,67	»	»	8.87	»	»	»
59	»	84,3	15,68	»	»	8.832	»	»	»
60	»	84,29	15,71	»	»	8.561	jaune-rougeâtre	finement cristalline	25,3
61	»	84	16	»	»	»	»	»	»
62	»	83,3	16,7	»	»	»	»	»	»
63	$SnCu^{9}$	82,81	17,19	»	»	8.462	jaune-rougeâtre	finement cristalline	23,9
64	»	82,5	17,5	»	»	8.792	gris-rougeâtre	id.	25,4
65	»	82	18	»	»	8.927	»	»	»
66	$SnCu^{8}$	81,15	18,85	»	»	8.86	»	»	»
67	$SnCu^{8}$	81,1	18,9	»	»	8.459	rouge-jaunâtre	finement cristalline	27,9
68	»	»	»	80,43	19,57	8.953	»	»	»
69	»	80	20	»	»	8.7	»	»	»
70	»	80	20	»	»	»	»	»	25,1
71	»	80	20	»	»	8.85	»	»	»
72	»	80	20	»	»	8.955	»	»	»
73	»	73	20	80,95	18,84	8.74	gris-rougeâtre	finement granulée	23,2
74	»	79,2	20,8	»	»	8.927	»	»	»

ORDRE de ductilité MALLET	DUCTILITÉ relative THURSTON	DURETÉ MALLET, CALVERT, JOHNSON	ORDRE de malléabilité MALLET	ORDRE de fusibilité MALLET	CONDUCTIBILITÉ CALORIFIQUE Ag = 100	CONDUCTIBILITÉ ÉLECTRIQUE Ag = 100	AUTORITÉ	REMARQUES
»	»	»	»	»	»	»	Bo	Métal pour artillerie.
»	»	»	»	»	»	»	Bo	Petite barre coulée dans un moule de fer.
»	»	»	»	»	»	»	Wa	Petite barre coulée dans un moule d'argile.
»	»	»	»	»	»	»	Wa	Moyenne de 12 échantillons, métal à canons.
»	»	»	»	»	»	»	Wa	Métal pour artillerie.
»	»	»	»	»	»	»	Bo	»
»	»	»	»	»	»	»	Ri	»
»	»	772,92	»	»	»	»	CJ	Moyenne de 83 échantillons.
»	»	»	»	»	»	»	Wa	»
»	»	»	»	»	»	12,1	Ma	Métal à canons.
»	»	»	»	»	»	»	La	»
»	»	»	»	»	»	10,15	Ma	»
»	7,3	»	»	»	»	»	U. S. B	»
»	»	»	»	»	»	»	W	»
»	13,09	»	»	»	»	»	U. S. B	*a*. Poids spécifique de la barre.
								b. Poids spécifique de fines rognures.
»	»	»	»	»	»	»	W	Le plus dense de tous les alliages? (Riche).
»	»	»	»	»	»	»	W	Corps d'essieu. Locomotive Seraing.
»	»	»	»	»	»	»	Mus	»
»	»	»	»	»	»	8,82	Ma	»
»	»	»	»	»	»	»	Ri	»
»	»	»	916,66	»	»	»	C. J	»
2	»	8	6	15	»	»	Ml	»
»	»	»	»	»	»	»	Bo	Boîtes de roues de voitures.
»	»	»	»	»	»	»	Bo	Poinçons des joailliers.
3	»	5	7	14	»	»	Ml	»
»	0,32	»	»	»	»	»	U. S. B	Le plus fort de la série.
»	»	»	»	»	»	»	R	Recuit et trempé.
»	»	»	»	»	»	»	Ri	»
4	»	4	10	13	»	»	Ml	»
»	»	»	»	»	»	»	Th	Gong chinois.
»	»	»	»	»	»	»	Bo	Cloches de Reichenhall (vieilles de 300 ans).
»	»	»	»	»	»	»	Mus	»
»	»	»	»	»	»	»	Ri	Recuit et trempé.
»	»	»	»	»	»	»	Ri	Après compressions répétées.
»	0,4	»	»	»	»	»	U. S. B	»
»	»	»	»	»	»	»	Ri	Recuit et trempé.

NUMÉROS	FORMULE ATOMIQUE	COMPOSITION ORIGINALE		COMPOSITION D'APRÈS ANALYSE		POIDS SPÉCIFIQUE	COULEUR	CASSURE	TÉNACITÉ EN KILOGRAMMES par mm. carré
		Cu	Sn	Cu	Sn				
75	$SnCu^7$	79,02	20,98	»	»	8.90	»	»	»
76	$SnCu^7$	78,97	21,03	»	»	8.728	rouge jaunâtre	vitreuse conchoïdale	21,4
77	»	78	22	»	»	»	»	»	»
78	»	77,5	22,5	»	»	8.917	gris rose	finement granulée	17,4
79	$SnCu^6$	76,32	23,68	76,64	23,24	8.565	»	douce	15,5
80	$SnCu^6$	76,31	23,69	»	»	8.91	»	»	»
81	$SnCu^6$	76,29	23,71	»	»	8.75	rouge bleuâtre	vitreuse	15,0
82	»	76,2	23,8	»	»	9.1 ?	»	»	»
83	»	75,2	24,8	»	»	»	»	»	»
84	»	75	25	»	»	»	»	»	»
85	$SnCu^5$	72,91	27,09	»	»	8.87	blanc jaunâtre	»	»
86	$SnCu^5$	72,9	27,1	»	»	8.965	»	»	»
87	$SnCu^5$	72,8	27,2	»	»	8.575	rouge bleuâtre	conchoïdale	7,7
88	»	72,5	27,5	»	»	8.925	blanc rougeâtre	id.	4,6
89	»	70	30	69,84	29,89	8.932	blanc	id.	3,9
90	»	68,82	31,18	»	»	»	»	»	»
91	$SnCu^4$	68,28	31,72	»	»	8.80	»	»	»
92	$SnCu^4$	68,27	31,73	»	»	8.948	»	»	»
93	$SnCu^4$	68,25	31,75	68,58	31,28	8.938	blanc	conchoïdale	1,1
94	$SnCu^4$	68,21	31,79	»	»	8.40	gris cendre	id.	1,1
95	»	68,21	31,79	»	»	»	»	»	»
96	»	67,5	32,5	»	»	8.907	blanc	conchoïdale	1,8
97	»	66,67	33,3	»	»	»	gris d'acier	»	»
98	»	66,67	33,3	»	»	»	»	»	0,7
99	»	65	35	65,34	34,47	8.947	gris bleu	»	1,6
100	»	62,5	37,5	»	»	8.956	gris sombre	radiée cristalline	1,1
101	$SnCu^3$	61,79	38,21	»	»	8.954	»	»	»
102	$SnCu^3$	61,79	38,21	»	»	8.96	»	»	»
103	$SnCu^3$	61,71	38,29	»	»	8.97	gris sombre	raboteuse pierreuse	0,5
104	$SnCu^3$	61,69	38,31	»	»	8.539	id.	tabulaire cristalline	0,8
105	»	60	40	»	»	»	»	»	»
106	»	57,5	42,5	»	»	8.781	gris clair	pierreuse	1,0
107	Sn^5Cu^{12}	56,32	43,68	56,7	43,17	8.682	id.	id.	1,0
108	»	52,5	47,5	»	»	8.643	id.	id.	»
109	$SnCu^2$	51,84	48,16	»	»	8.57	»	»	»
110	$SnCu^2$	»	»	»	»	8.512	»	»	»
111	$SnCu^2$	51,83	48,17	»	»	8.533	»	»	»
112	$SnCu^2$	51,8	48,2	51,62	48,09	8.56	gris clair	»	1,8

ORDRE de ductilité MALLET	DUCTILITÉ relative THURSTON	DURETÉ MALLET, CALVERT, JOHNSON	ORDRE de malléabilité MALLET	ORDRE de fusibilité MALLET	CONDUCTIBILITÉ CALORIFIQUE Ag = 100	CONDUCTIBILITÉ ÉLECTRIQUE Ag = 100	AUTORITÉ	REMARQUES
»	»	»	»	»	»	»	Ri	»
5	»	3	11	12	»	»	Ml	»
»	»	»	»	»	»	»	Bo	»
»	0,02	»	»	»	»	»	U. S. B	»
»	»	»	»	»	»	»	U. S. B	»
»	»	»	»	»	»	»	Ri	»
0	»	2	12	11	»	»	Ml	»
»	»	»	»	»	»	»	Bo	Cloches de Reichenhall (vieilles de 600 ans).
»	»	»	»	»	»	»	Bo	Cloches suisses sec.
»	»	»	»	»	»	»	W	»
»	»	»	»	»	»	»	Ri	»
»	»	rompu	»	»	»	»	CJ	»
0	»	1	13	10	20,7	»	Ml	»
»	0,003	»	»	»	»	»	U. S. B	»
»	0,008	»	»	»	»	»	U. S. B	»
»	»	»	»	»	»	»	Bo	Miroirs de télescope.
»	»	»	»	»	»	»	Ri	»
»	»	rompu	»	»	»	»	CJ	»
»	»	»	»	»	15,5	»	U. S. B	»
0	»	6	14	9	»	»	Ml	»
»	»	»	»	»	»	»	Bo	Métal à miroirs.
»	0,009	»	»	»	»	»	U. S. B	»
»	»	»	»	»	»	»	W	Dur uniforme.
»	»	»	»	»	»	»	Mus	»
»	0,002	»	»	»	»	»	U. S. B	»
»	0,001	»	»	»	»	»	U. S. B	»
»	»	rompu	»	»	49,4	»	CJ	
»	»	»	»	»	»	»	Ri	
»	0,003	»	»	»	»	»	U. S. B	Densité max. le plus faible.
0	»	7	16	8	»	»	Ml	»
»	»	»	»	»	»	»	Bo	Métal blanc pour cloches.
»	0,001	»	»	»	»	»	U. S. B	»
»	0,003	»	»	»	»	»	U. S. B	
»	0,001	»	»	»	»	»	U. S. B	Le plus faible sous un effort transversal.
»	»	»	»	»	»	»	Ri	»
»	»	»	»	»	»	»	Cr	»
»	»	»	»	»	»	»	CJ	»
»	0,003	rompu	»	»	42,8	»	U. S. B	Remarquable pour sa liquation.

NUMÉROS	FORMULE ATOMIQUE	COMPOSITION ORIGINALE		COMPOSITION D'APRÈS ANALYSE		POIDS SPÉCIFIQUE	COULEUR	CASSURE	TÉNACITÉ EN KILOGRAMMES par mm. carré
		Cu	Sn	Cu	Sn				
113	$SnCu^2$	51,75	48,25	»	»	8.416	blanc gris	vitreuse conchoïdale	2,7
114	»	50	50	»	»	»	»	»	0,5
115	»	50	50	»	»	8.79	blanc bleuâtre	»	»
116	Sn^7Cu^2	47,95	52,05	47,61	52,14	8.442	blanc grisâtre	grain fin	1,1
117	»	47,5	52,5	»	»	8.446	id.	cristalline	1,7
118	Sn^2Cu^3	44,67	55,33	»	»	8.3	id.	»	»
119	Sn^2Cu^3	44,63	55,37	44,52	55,28	8.312	id.	cristalline	2,1
120	»	42,5	57,5	»	»	8.437	id.	id.	1,5
121	Sn^3Cu^4	41,74	58,26	42,38	57,30	8.302	id.	id.	2,8
122	»	40	60	»	»	»	»	»	»
123	Sn^5Cu^6	39,2	60,8	38,37	61,32	8.182	blanc grisâtre	cristalline	2,0
124	»	37,5	62,5	»	»	8.101	id.	id.	1,7
125	SnCu	34,99	65,01	»	»	8.12	»	»	»
126	SnCu	34,98	65,02	»	»	7.992	»	»	»
127	SnCu	»	»	»	»	8.072	»	»	»
128	SnCu	34,95	65,05	34,22	65,8	8.013	blanc grisâtre	cristalline	2,4
129	SnCu	34,92	65,08	»	»	8.056	id.	tabulaire cristalline	2,2
130	»	33,33	66,67	»	»	»	blanc	»	»
131	»	32,5	67,5	»	»	7.931	blanc grisâtre	cristalline	1,6
132	Sn^4Cu^3	28,72	71,28	25,85	73,8	7.918	id.	id.	1,2
133	»	27,5	72,5	»	»	7.915	id.	id.	3,1
134	»	25	75	»	»	7.813	blanc bleuâtre	id.	»
135	Sn^5Cu^3	24,38	75,62	23,35	76,29	7.835	blanc grisâtre	finement cristalline	4,8
136	»	22,5	77,5	»	»	7.774	id.	»	3,5
137	»	21,74	78,26	21,38	77,63	7.53	blanchâtre	»	»
138	Sn^2Cu	21,21	78,79	»	»	7.738	»	»	»
139	Sn^2Cu	21,21	78,79	»	»	7.74	»	»	»
140	Sn^2Cu	21,18	78,82	20,25	79,63	7.77	blanc grisâtre	cristalline	3,0
141	Sn^2Cu	21,15	78,85	»	»	7.387	id.	»	6,1
142	Sn^5Cu^2	17,68	82,32	»	»	7.652	»	»	»
143	»	17,5	82,5	»	»	7.69	blanc grisâtre	cristalline	2,0
144	»	16,4	83,6	»	»	»	»	»	»
145	Sn^3Cu	15,21	84,79	»	»	7.53	»	»	»
146	Sn^3Cu	15,21	84,79	»	»	7.606	»	»	»
147	Sn^3Cu	15,19	84,81	15,08	84,62	7.657	blanc grisâtre	cristalline	4,6
148	Sn^3Cu	15,17	84,83	»	»	7.447	id.	grossièrement cristalline	4,9

ORDRE de ductilité MALLET	DUCTILITÉ relative THURSTON	DURETÉ MALLET, CALVERT, JOHNSON	ORDRE de malléabilité MALLET	ORDRE de fusibilité MALLET	CONDUCTIBILITÉ CALORIFIQUE Ag = 100	CONDUCTIBILITÉ ÉLECTRIQUE Ag = 100	AUTORITÉ	REMARQUES
0	»	»	»	»	»	»	Ml	»
»	»	9	15	7	»	»	Mus	»
»	»	»	»	»	»	»	W	Très légèrement malléable.
»	0,003	»	»	»	»	»	USB	»
»	0,003	»	»	»	»	»	USB	»
»	»	»	»	»	»	»	Ri	»
»	0,003	»	»	»	»	»	USB	»
»	0,006	»	»	»	»	»	USB	»
»	0,007	»	»	»	»	»	USB	»
»	»	»	»	»	»	»	Bo	Métal blanc pour cloches.
»	0,005	»	»	»	»	»	USB	»
»	0,004	»	»	»	»	»	USB	»
»	»	»	»	»	»	»	Ri	»
»	»	rompu	»	»	41,5	»	CJ	»
»	»	»	»	»	»	»	Cr	»
»	0,005	»	»	»	»	»	USB	»
0	»	11	9	6	»	»	T	»
»	»	»	»	»	»	»	W	Sec uniforme.
»	0,014	»	»	»	»	»	USB	»
»	0,011	»	»	»	»	»	T	»
»	0,018	»	»	»	»	»	T	»
»	»	»	»	»	»	»	W	»
»	0,03	»	»	»	»	»	T	»
»	0,12	»	»	»	»	»	T	»
»	»	»	»	»	»	»	W	Jaune, blanc, verdâtre.
»	»	135,42	»	»	43,1	»	CJ	»
»	»	»	»	»	»	»	Ri	»
»	0,06	»	»	»	»	»	T	»
0	»	12	8	5	»	»	Ml	»
»	»	»	»	»	»	»	Cr	»
»	0,2	»	»	»	»	»	T	»
»	»	»	»	»	»	12,76	Ma	»
»	»	»	»	»	»	»	Ri	»
»	»	104,17	»	»	42,3	»	CJ	»
»	0,92	»	»	»	»	»	T	»
0	»	13	15	4	»	»	Ml	»

NUMÉROS	FORMULE ATOMIQUE	COMPOSITION ORIGINALE Cu	Sn	COMPOSITION D'APRÈS ANALYSE Cu	Sn	POIDS SPÉCIFIQUE	COULEUR	CASSURE	TÉNACITÉ EN KILOGRAMMES par mm. carré
149	»	12,5	87,5	»	»	7.543	id.	cristalline	2,7
150	Sn^4Cu	11,86	88,14	»	»	7.558	»	»	»
151	Sn^4Cu	11,84	88,16	11,49	88,47	7.552	blanc grisâtre	cristalline	4,5
152	Sn^4Cu	11,84	88,16	»	»	7.5	»	»	»
153	Sn^4Cu	11,82	88,18	»	»	7.472	blanc grisâtre	grossièrement cristalline	4,9
154	Sn^5Cu	9,73	90,27	»	»	7.517	»	»	»
155	Sn^5Cu	9,73	90,27	»	»	7.52	»	»	»
156	Sn^5Cu	9,7	90,3	8,57	91,39	7.49	blanc grisâtre	granulée	4,5
157	Sn^5Cu	9,68	90,32	»	»	7.442	id.	friable	2,4
158	»	9,09	90,91	»	»	7.472	»	»	»
159	»	7,5	92,5	»	»	7.417	blanc grisâtre	granulée	4,3
160	»	6,43	93,57	»	»	»	»	»	»
161	$Sn^{12}Cu$	4,29	95,71	3,72	96,31	7.36	blanc grisâtre	granulée	3,4
162	»	2,5	97,5	»	»	7.342	id.	fibreuse	3,9
163	$Sn^{18}Cu$	1,11	98,89	0,74	99,02	7.305	id.	id.	2,6
164	$Sn^{96}Cu$	0,56	99,44	0,32	99,46	7.299	id.	id.	3,2
165	Sn	0	100	»	»	7.293	id.	id.	2,5
166	»	0	100	»	»	7.291	blanc	id.	4,3
167	»	0	100	»	»	7.297	»	»	1,5
168	»	0	100	»	»	7.294	»	»	»
169	»	0	100	»	»	7.305	»	»	»
170	»	0	100	»	»	»	»	»	»
171	»	0	100	»	»	»	»	»	»

Liste des auteurs cités dans le tableau précédent. — Bo : Bolley, *Essais et Recherches chimiques*, Paris, 1869, p. 345, 348.

Cr : Croockewit, *Erd'manns Journal*, 1848, vol. XIV, p. 87, 93.

C. J. Calvert et Johnson, *Poids spécifiques* (*Phil. Mag.*, 1859, vol. XVII, p. 114, 121); *Conductibilité de la chaleur* (*Phil. Trans.*, 158, p. 349, 368).

De : S.-D. Deam, *Notes d'artillerie*, n° XL, Washington, 1875.

La : Lafond, *Dingler's Journal*, 1855, vol. CXXXV, 269.

Ml : Mallet, *Phil. Mag.*, 1842, vol. XXI, p. 66 et 68.

Ma : Matthiessen, *Phil. Trans.*, 1860, p. 161 ; 1863, p. 167, 200.

Mar : Marchand et Scheerer, *Journal für praktische Chemie*, vol. XXVII, p. 193 (Clark, *Constantes de la nature*)

ORDRE de ductilité MALLET	DUCTILITÉ relative THURSTON	DURETÉ MALLET, CALVERT, JOHNSON	ORDRE de malléabilité MALLET	ORDRE de fusibilité MALLET	CONDUCTIBILITÉ CALORIFIQUE Ag = 100	CONDUCTIBILITÉ ÉLECTRIQUE Ag = 100	AUTORITÉ	REMARQUES
»	4,71	»	»	»	»	»	T	»
»	»	95,81	»	»	40,6	»	CJ	»
»	7,08	»	»	»	»	»	T	»
»	»	»	»	»	»	»	Ri	»
8	»	14	4	3	»	»	Ml	»
»	»	83,33	»	»	39,6	»	CJ	»
»	»	»	»	»	»	»	Ri	»
»	23,47	»	»	»	»	»	T	»
6	»	15	3	2	»	»	Ml	»
»	»	»	»	»	»	»	W	Légèrement malléable.
»	40,06	»	»	»	»	»	USB	»
»	»	»	»	»	»	12,03	Ma	»
»	56,77	»	»	»	»	»	USB	»
»	121,9	»	»	»	»	»	USB	»
»	133,9	»	»	»	»	»	USB	»
»	208,8	»	»	»	»	»	USB	»
»	219,8	»	»	»	»	»	USB	»
7	»	16	1	1	»	»	Ml	
»	»	»	»	»	»	»	Wa	
»	»	»	»	»	»	11,45	Ma	»
»	»	»	»	»	»	»	Cr	»
»	»	27	»	»	42,2	»	CJ	»
»	»	»	»	»	15,2	17	We (*)	»

Mus : Musschenbrock. *Ure's Dictionary*, article *Alloy*.
Ri : Riche, *Annales de Chimie et de Physique*, 1873, vol. XX, p. 351, 419.
USB : *Rapport de la Commission des Alliages métalliques, nommée par le Bureau des États-Unis, pour les essais de fer, d'acier*, etc.
T : Thomas Tomsom, *Annales de Chimie*, 1814, p. 46, 58.
W : Watt, *Dictionnaire de Chimie*.
Wa : Major Wade, de l'armée des États-Unis (*Rapport sur les expériences sur les métaux pour canons*, 1856).
We : Wiedmann (*Phil. Mag.*, 1860, vol. XIX, p. 243, 244).

Dans son livre sur *les Alliages métalliques* (traduit par M. Boudouard), Hiorns fait suivre ce tableau de quelques remarques fort intéressantes que nous tenons à reproduire.

Les nombres relatifs à la ductilité, à la fusibilité et à la dureté sont donnés d'après les expériences de Mallet et sur une série de 16 alliages, le nombre 1 représentant le maximum et 16 le minimum de la propriété. La ductibilité des métaux cassés est représentée par le nombre 0.

La ductilité relative donnée par la Commission des États-Unis est l'extension proportionnelle des fibres extérieures des pièces soumises à la torsion, déterminée par une méthode d'enregistrement. L'ordre de ductilité ainsi obtenu diffère beaucoup de celui de Mallet.

Les nombres se rapportant à la dureté relative, d'après Calvert et Johnson, ont été obtenus par l'emploi d'un instrument contondant ; l'échelle est telle que la fonte a la valeur de 1000. Le mot « rompu », dans cette colonne, indique que l'alliage s'est rompu, montrant que la dureté relative ne pouvait pas être mesurée, mais qu'elle était considérablement plus grande que celle de la fonte.

Pour les poids spécifiques, il y a accord entre les différents auteurs pour les alliages contenant moins de 35 0/0 d'étain ; les nombres de Mallet sont cependant généralement beaucoup plus bas que ceux des autres auteurs. Dans les alliages contenant moins de 35 0/0 d'étain, il y a une grande variation parmi les nombres donnés par les différents auteurs, ceux de Mallet étant généralement inférieurs. Quelques résultats signalés par M. Riche, qui a étudié l'influence du recuit, de la trempe et de la compression, montrent que la compression tend spécialement à augmenter le poids spécifique des alliages contenant de 8,9 à 20 0/0 de zinc ; ceci tient simplement à la disparition des soufflures, par suite à la diminution de la porosité.

Le poids spécifique 8,953 a été obtenu par le major Wade en coulant dans un moule en fer une petite barre d'un métal, qui, s'il était coulé dans un moule d'argile, avait un poids spéci-

fique de 8,313. Le premier résultat est exceptionnellement haut, et il indique probablement que les circonstances de la fusion, de la coulée et du refroidissement étaient favorables à l'exclusion des gaz donnant les soufflures et à la formation d'un métal parfaitement compact.

Les nombres relatifs à la ténacité, donnés par Mallet, Musschenbrock et Wade, s'accordent avec ceux trouvés dans les expériences autant qu'on peut l'espérer, étant données les résistances très variables d'alliages de même composition indiquées par tous les auteurs.

Le nombre de Mallet pour le cuivre, 38,7 par millimètre carré, est certainement beaucoup trop haut pour le cuivre fondu ; la pièce, qu'il a essayée, était certainement laminée ou peut-être étirée en fils. Haswell, dans son *Dictionnaire*, donne les nombres suivants pour la résistance du cuivre à la tension ; il n'indique pas les auteurs :

Cuivre forgé.............	23,9	kilogr. par millim. carré.
Cuivre laminé...........	25,3	—
Cuivre fondu (Amérique)..	17,0	—
Cuivre en fils.............	43,0	—
Cuivre en chevilles........	25,9	—

Nous avons donné au chapitre I, page 8, les valeurs qu'il faut admettre pour le cuivre et qui découlent de nombreuses expériences.

La résistance du bronze à canons n'est pas donnée dans le tableau, dans lequel on ne compare que les chiffres relatifs à la ténacité des alliages fondus dans les conditions ordinaires et non d'alliages comprimés, laminés ou coulés sous pression.

D'autre part, Thurston a fait des essais que nous ne saurions passer sous silence ; ils sont résumés dans les tableaux suivants:

FORMULE ATOMIQUE	COMPOSITION DU MÉLANGE		ANALYSE DE L'ALLIAGE		POIDS SPÉCIFIQUE	ESSAIS A LA FLEXION Sur barres rectangulaires de 0,0240,025 Distance des appuis 1m,10				
	Cuivre	Étain	Cuivre	Étain		MODULE de rupture en kil. par cent. carré	LIMITE d'élasticité	FLÈCHE av. rupture en millim.	RÉSISTANCE en kilogr. pour une flèche de 0,07	MODULE d'élasticité en kil.
Cu	100 »	0,00	—	—	8.791	2089,4	0,140	non cassé	26,392	714.224
$SnCu^{96}$	98,10	1,90	97,89	1,90	8.564	—	—	—	—	—
$SnCu^{48}$	96,27	3,73	96,06	3,76	8.649	2326,2	0,350	non cassé	33,075	961.775
$SnCu^{34}$	92,80	7,20	92,11	7,80	8.694	3061,2	0,426	id.	42,860	998.439
—	92,59	7,50	94,11	5,43	8.684	2706,1	0,370	id.	36,459	950.726
—	90 »	10 »	90,27	9,58	8.669	3478 »	0,400	id.	47,611	980.849
—	87,50	12,50	88,41	11,59	8.648	4228,2	0,353	101 »	57,289	873.085
$SnCu^{12}$	86,57	13,43	87,15	12,73	8.681	—	—	76 »	21,286	—
—	82,50	17,50	82,70	17,34	8.792	4855,1	0,565	16 »	7,969	1060.686
—	80 »	20 »	80,95	18,84	8.740	3970 »	0,657	12 »	6,113	931.293
—	77,50	22,50	77,56	22,25	8.917	2094,8	1 »	4 »	0,775	1060.067
$SnCu^{6}$	76,32	23,68	76,64	23,24	8.565	2254,7	1 »	6 »	1,127	944.658
—	72,50	27,50	72,89	26,85	8.925	635,8	1 »	1,3	0,078	1137.092
—	70 »	30 »	69,84	29,89	8.932	845,3	1 »	1,5	0,133	1062.521
$SnCu^{4}$	68,25	31,75	68,58	31,26	8.938	643,4	1 »	1 »	0,082	1098.618
$Sn^{2}Cu$	21,18	78,82	20,25	79,63	7.770	701,3	0,333	8,8	0,738	682.054
—	17,50	82,50	16,70	83,23	7.690	720,1	0,267	13,7	1,588	514.937
$Sn^{3}Cu$	15,19	84,81	15,08	84,62	7.657	634,4	0,222	22 »	1,778	492.249
—	12,50	87,50	11,69	88,24	7.543	717,8	0,200	27,6	2,955	553.101
$Sn^{4}Cu$	11,84	88,16	11,49	88,47	7.552	749,4	0,250	non cassé	10,587	728.217
$Sn^{5}Cu$	9,70	90,30	8,57	91,39	7.484	371,3	0,250	id.	6,033	543.618
—	7,50	97.50	6,05	93,77	7.417	683,5	0,207	id.	10,183	557.879
$Sn^{12}Cu$	4,29	95,71	3,72	96,31	7.360	484,7	0,190	id.	5,485	602.924
—	2,50	97,50	2,11	97,68	7.342	586,2	0,240	id.	8,920	468.480
$Sn^{18}Cu$	1,11	98,89	0,74	99,02	7.305	277,9	0,333	id.	4,576	474.005
$Sn^{96}Cu$	0,55	99,43	0,32	99,46	7.290	310,6	0,300	id.	4,131	657.905
Sn	0,00	100 »	—	—	7.293	261,8	0,275	id.	4,111	471.438

ESSAIS A LA TRACTION					ESSAIS A LA COMPRESSION		ESSAIS A LA TORSION			
CHARGE DE RUPTURE en kil. par mill. carré		LIMITE d'élasticité	ALLONGEMENT pour 100	RAPPORTS des sections de rupture et primitive	CHARGE d'écrasement en kilogrammes par millim. carré	CONTRACTION	MOMENT DE TORSION en kilogrammes		DUCTILITÉ	
De la section primitive	De la section de rupture						Maxima	Limite d'élast.	Angle de torsion en degrés	Extension de la fibre extérieure
18,9	23,8	0,518	0,0647	0,92	29,5	0,10	19,767	0,553	153	0,3083
»	»	»	»	»	23,8	0,10	20,763	0,248	317,50	1,0006
22,5	30	0,500	0,1429	0,86	29,5	0,10	21,656	0,338	247,40	0,7031
20	23,7	0,666	0,0553	0,92	29,5	0,10	22,081	0,383	125,60	0,2189
18,9	24,1	0,502	0,0743	0,88	»	»	21,614	0,333	187,25	0,4318
18,8	21,2	0,586	0,0366	0,93	26,7	0,10	24,188	0,414	114,50	0,1795
21,8	23,3	0,675	0,0356	0,97	»	»	24,150	0,385	70,75	0,0739
20,7	21,5	0,680	0,0333	0,98	37,2	0,10	25,160	0,446	100	0,1391
26,1	26,1	»	0,0071	1	»	»	27,332	0,516	14	0,0032
23,1	23,1	»	0,0040	1	54,8	0,10	26,240	0,623	16,30	0,0040
18,7	18,7	1	0,0054	1	»	»	21,246	0,714	4,38	0,0003
15,4	15,4	1	»	1	80,1	0,0905	16,873	1	3,40	0,0002
4,5	4,5	1	»	1	»	»	4,904	1	1	0,00003
3,9	3,9	1	»	1	121,4	0,035	2,426	1	1,50	0,00008
1,1	1,1	1	»	1	»	»	»	»	»	»
3	3	»	»	1	11,4	0,10	3,164	0,930	5,69	0,0006
1,9	1,9	»	»	1	»	»	3,365	0,784	10,62	0,0020
4,5	4,5	0,844	0,0067	1	4,5	0,10	3,146	0,753	24,83	0,0092
2,6	2,6	0,527	0,0055	0,99	»	»	3,430	0,779	56,50	0,0471
4,3	4,6	0,549	0,0410	0,98	7,1	0,10	3,207	0,653	61,75	0,0703
4,4	5,3	0,543	0,0687	0,92	»	»	3,171	0,631	131,75	0,2347
3,9	5,7	0,427	0,2022	0,87	»	»	2,736	0,556	178	0,4006
3,3	4,8	0,575	0,1232	0,84	»	»	3,150	0,514	220,50	0,5677
3,9	8,7	0,214	0,4000	0,68	»	»	2,173	0,474	362	1,2189
3,8	5,5	»	0,2279	0,70	»	»	2,524	0,448	387,50	1,3388
3,1	9,3	0,559	0,3544	0,58	»	»	2,272	0,418	535,30	2,0879
3,4	»	0,467	0,3551	0,50	»	0,10	1,759	0,453	556,75	2,1975

Le maximum et le minimum de ténacité sont donnés par les formules :

$$\text{T maximum} = 2{,}109 + 70{,}3\ e,$$
$$\text{T minimum} = 2{,}400 + 50{,}0\ e,$$

dans lesquelles *e* est la teneur en étain, à condition d'employer des métaux purs.

Pour la résistance à la compression, la teneur en étain doit se tenir entre 10 et 15 0/0, si les pièces sont soumises au choc ; on peut aller à 30 0/0, si l'on ne recherche que la ténacité maximum.

Les bronzes à 80 0/0 de cuivre et 20 0/0 d'étain possèdent la plus grande résistance à la flexion.

Thurston remarque que les courbes de résistance à la traction, à la flexion et à la torsion présentent leur ordonnée maxima à peu près au même point correspondant à : cuivre, 82,7 ; étain, 17,3. Nous verrons que ce résultat n'est pas absolument juste.

A partir de ce point, les trois courbes descendent d'abord rapidement jusqu'au point 37,5 de cuivre, qui correspond à peu près au minimum.

La courbe de compression atteint son maximum entre ces deux points.

L'alliage le moins résistant correspond à peu près à 45 0/0 de cuivre.

Avant d'entreprendre l'étude des bronzes spéciaux, nous avons voulu étudier nous-même les propriétés mécaniques les plus importantes des alliages de cuivre et d'étain riches en cuivre.

Voici les résultats de cette étude :

COMPOSITION		ESSAIS MÉCANIQUES				
Cu	Sn	R	E	A 0/0	CHOC	DURETÉ [1]
95	5	19,2	?	20	9	65
91	9	25,4	10,3	19,5	7	76
89	11	26,3	12,7	16,0	5	88
87	13	25,4	13,7	3	3	95
84	16	25	17	1,4	0	117
79	21	20,0	20	0	0	140

(Voir, plus loin, la variation de résistance pour les bronzes épurés au phosphore.)

On voit que la charge de rupture, la limite élastique croissent d'abord avec la teneur en étain et semblent diminuer après 11 0 0. Quant aux allongements, aux strictions et à la résistance au choc, ils diminuent quand l'étain croît, tandis que la dureté augmente.

Au-delà de 13 0/0 d'étain, les allongements, les strictions et la résistance au choc prennent des valeurs très faibles, la résistance reste à peu près constante, puis commence à décroître aux environs de 80 0/0.

Au-dessous de 78 0/0 de cuivre, le bronze est même difficile à essayer à la traction, les éprouvettes se cassant avec une facilité remarquable. La dureté continue à croître ; mais il est à noter que nous n'avons pas dépassé dans nos expériences 30 0/0 d'étain.

Nous avons trouvé :

1. Ces essais ont été faits sous une pression $p = 500$ kilogrammes.

COMPOSITION		CHIFFRE DE BRINNELL Δ
CUIVRE	ÉTAIN	
84	16	117
82	18	130
80	20	140
78	22	159
76	24	192
74	26	229
70	30	192

D'autres expérimentateurs ont montré que la dureté des alliages étain-cuivre croît jusqu'à la composition : 73, cuivre ; 27, étain ; pour des alliages plus riches en étain, la dureté diminue rapidement et, à partir d'une teneur de 10 0/0 de cuivre, elle est sensiblement constante et égale à celle de l'étain pur.

Densité. — La densité des alliages étain-cuivre a été étudiée par M. Riche. Ce savant utilisait de la limaille prise sur la pièce métallique dans la partie haute et dans la partie basse.

Le chiffre adopté était la moyenne.

On sait que le maximum de densité est atteint pour la combinaison $SnCu^3$.

Liquation. — M. Riche a, d'autre part, étudié les liquations des alliages étain-cuivre. Voici les résultats obtenus :

ALLIAGES CUIVRE-ÉTAIN. — RÉSULTATS DE RICHE

		COMPOSITION		POURCENTAGE D'ÉTAIN		POURCENTAGE D'ÉTAIN dans la portion solidifiée en dernier	PROPRIÉTÉS PHYSIQUES
		Cu	Sn	HAUT	BAS		
1.	$CuSn^5$	9,73	90,27	87,87	92,9	98,50	Gris d'étain mou comme l'étain, non cristallin.
2.	$CuSn^3$	15,21	84,79	83,15	78,90	96,99	Gris d'étain, cristallisant par lent refroidissement.
3.	$CuSn^2$	21,21	78,79	74,97	77,4	94,40	Gris d'étain, cristallisé, assez dur.
4.	CuSn	34,99	65,01	55 »	80 »	82,83	Gris blanc, cristallin, sec.
5.	Cu^2Sn	51,84	48,16	»	»	50,42	Gris bleu, comme le zinc, cristallin, très sec.
6.	Cu^3Sn	61,79	38,21	37,29	37,66	37,37	Bleu, grain fin, pulvérisable dans un mortier.
7.	Cu^4Sn	68,28	31,72	30,44	30,83	30,91	Blanc, cassant comme le verre.
8.	Cu^5Sn	72,91	27,09	27,15	26,78	27,76	Blanc, avec reflet jaune, cristallin, très dur.
9.	Cu^6Sn	76,31	23,69	23,37	23,69	25,17	Jaunâtre, très dur, grain fin, malléable au rouge sombre.
10.	Cu^7Sn	79,02	20,98	21,00	21,32	24,85	id.
11.	Cu^8Sn	81,15	18,85	18,88	18,56	24,6	id.
12.	$Cu^{10}Sn$	84,33	15,67	15,18	15,18	20,06 / 24,50	Jaune franc.
13.	$Cu^{15}Sn$	89,00	11,00	»	»	13,1	Métal à balles.

On voit que la liquation, qui est très faible dans l'alliage Cu^4Sn est plus sensible au fur et à mesure que la teneur en étain augmente.

Trempe des bronzes. — Au sujet des savantes recherches de MM. Heycock et Neville, nous avons fait remarquer l'importance que pouvaient avoir les transformations mises en vue par la micrographie sur les propriétés mécaniques des bronzes, et nous nous étonnions que des recherches systématiques n'aient point été faites à ce sujet, à moins que ces recherches, faites au contraire à l'abri de toute indiscrétion, n'aient conduit à des résultats industriels tels que les auteurs eussent cru ne pas devoir les publier.

Toutefois on sait bien déjà que la trempe modifie considérablement les propriétés de ce métal.

D'Arcet est le premier qui se soit préoccupé de la trempe des

bronzes; il a montré que certains s'adoucissaient nettement par ce traitement.

Dussaussoy a montré que l'un des alliages qui supporte le mieux la trempe est celui répondant à la composition :

Cu..........................	88,88
Sn..........................	11,12

Sa résistance et ses allongements augmentent. D'après Dussaussoy, les bronzes trop riches en étain sont insensibles à la trempe. Ceci est en accord avec les recherches de Heycock et Neville. Riche a, de plus, observé, comme nous l'avons dit, que les alliages riches en étain (au moins 18 0/0) augmentent de densité par trempe.

Voici enfin comment s'exprime, à ce sujet, A. Krupp dans son livre, *Die Legierungen* (Vienne, 1894, p. 144) :

« Si l'on refroidit le bronze incandescent rapidement dans l'eau froide, il perd presque entièrement son aigreur et peut alors parfaitement servir à certains usages. Le meilleur alliage susceptible d'être ainsi traité est celui qui renferme 84 0/0 Cu et 16 0/0 Sn. Si même la pièce est suffisamment épaisse, elle prend dans toute son épaisseur une certaine malléabilité qu'elle conserve après forgeage. Veut-on rendre à une pièce coulée, trempée ou fondue, sa dureté primitive, on n'a qu'à la porter à l'incandescence et à la refroidir lentement, elle redevient dure aussitôt. »

Et A. Krupp conclut :

« Le bronze, d'après ce qui précède, se comporte donc tout différemment de l'acier, qui devient très dur et fragile par brusque refroidissement et qu'un refroidissement lent rend mou et forgeable. Dans le bronze, un brusque refroidissement diminue la compacité et la dureté qu'augmente au contraire un brusque refroidissement. De plus, les pièces en bronze brusquement refroidies ont un ton plus grave, particularité qu'on ne doit pas perdre de vue dans la fabrication des cloches. » Nous ferons remarquer que la conclusion de A. Krupp,

dans laquelle il compare l'effet de la trempe sur l'acier et le bronze, n'est juste que si l'acier contient une quantité de carbone assez élevée. Bien au contraire, pour les fers et aciers extra-doux (contenant au maximum 0,120 0/0 de carbone), il y a plus grande homogénéité, moindre fragilité après refroidissement brusque.

Si l'on se reporte au diagramme de MM. Heycock et Neville donné plus haut, on voit qu'à la température ordinaire les bronzes mécaniques industriels, c'est-à-dire les alliages contenant plus de 75 0/0 de cuivre, se divisent en deux catégories :

De 0 à 9 0/0 d'étain : solution α;

De 9 à 31 — solution $\alpha + \delta$.

La solution α, qui a été définie par des caractères micrographiques, contient de 0 à 9 0/0 d'étain. Le composé δ serait la combinaison Cu^4Sn.

Les bronzes renfermant moins de 9 0/0 d'étain sont toujours formés de la solution α, quelle que soit la température à laquelle ils se trouvent; tandis que ceux renfermant de 9 à 22 0/0 d'étain environ changent de constitution à 500° et sont alors formés de la solution α et de la solution β, celle-ci renfermant de 22,5 à 27 0/0 d'étain.

Quant à ceux qui renferment un peu plus d'étain, ils subissent des transformations plus accentuées, qui sont indiquées sur le diagramme.

Nous nous sommes demandé si ces transformations ne pourraient pas avoir un intérêt industriel.

Ceci nous a conduit tout naturellement à étudier la trempe de ces alliages, c'est-à-dire un refroidissement brusque ayant pour but de maintenir le métal dans l'état où il se trouve au moment même où on le refroidit.

Dans nos recherches, nous avons trempé des bronzes renfermant de 22 à 5 0/0 d'étain à des températures croissantes depuis 300 jusqu'à 800°.

Voici les résultats que nous avons obtenus :

TYPE I

Cu 79
Sn.. 21

TEMPÉRATURE DE TREMPE	R	E	A 0/0
Non trempé	20,0	5,5	0
550	38,6	12,2	2,8
650	38,3	11,1	0,7
700	35,8	21,2	2,9
750	35,2	23,2	1,5

TYPE II

Cu.. 84
Sn 16

TEMPÉRATURE DE TREMPE	R	E	A 0/0
Non trempé	25	4,7	1,4
300	22	?	0
400	24,4	?	0
500	19.4	5,6	1,4
550	40,1	10,1	5,9
600	42,6	?	3,6
650	36,3	?	1,4
700	34.4	?	2,9
750	29,6	?	5

TYPE III

Cu.. 87
Sn.................................... 13

TEMPÉRATURE DE TREMPE	R	E	A 0/0
Non trempé	24,1	13,7	3
500	21,7	14,0	3
550	23,7	?	5
600	28,0	10,5	10
650	28,0	8,4	9
700	28,0	10,4	13
750	30,5	?	19
800	25,4	8,4	9

TYPE IV

Cu.. 91
Sn.. 59

TEMPÉRATURE DE TREMPE	R	E	A 0/0
Non trempé	25,4	10,3	16,5
400	18,4	10,5	14
500	18,4	10,5	11,5
600	25	9,2	23,5
700	25	10,5	23,5
800	20,7	7,1	30
900	3,9	3,9	2

TYPE V

Cu.. 95
Sn.. 5

TEMPÉRATURE DE TREMPE	R	E	A 0/0
Non trempé	19,2	?	20
300	24,0	10,3	27,5
450	24,6	11,1	27
550	23,4	6,8	28
600	21,0	?	27
650	19,3	6,1	25
700	19,3	4,8	20
750	19,2	7,5	22
800	6,7	?	3

Si nous rapprochons ces différents résultats qui sont résumés dans les courbes des figures 150 à 154, on reconnaît que :

1° Les alliages renfermant plus de 92 0/0 de cuivre voient leur charge de rupture augmenter un peu par trempe à basse température entre 400 et 600°. Les allongements subissent des variations analogues ;

2° Pour des métaux contenant moins de 92 0/0 de cuivre, la charge de rupture et les allongements croissent très

nettement dès que la température de trempe dépasse 500°. Ceci est absolument d'accord avec le diagramme de MM. Heycock et Neville.

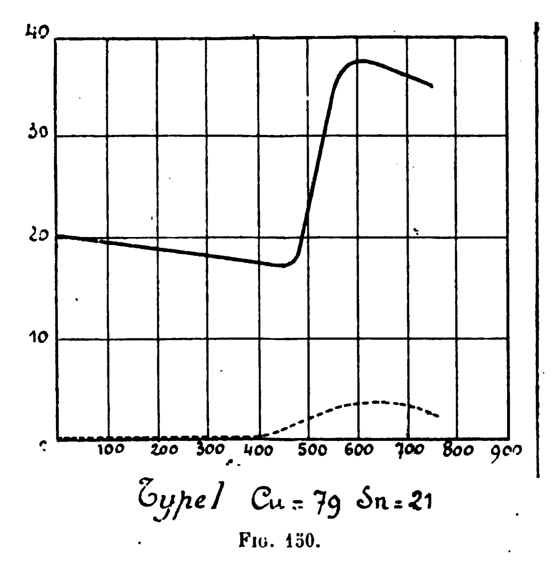


Fig. 150.

Le maximum de la charge de rupture est atteint, quel que soit le bronze, pour une trempe faite aux environs de 600°.

Le maximum des allongements paraît, au contraire, se déplacer avec la composition de l'alliage. Il a lieu pour une trempe à 800° pour le bronze Cu = 91, Sn = 19; pour une trempe à 600° pour l'alliage Cu = 79, Sn = 21.

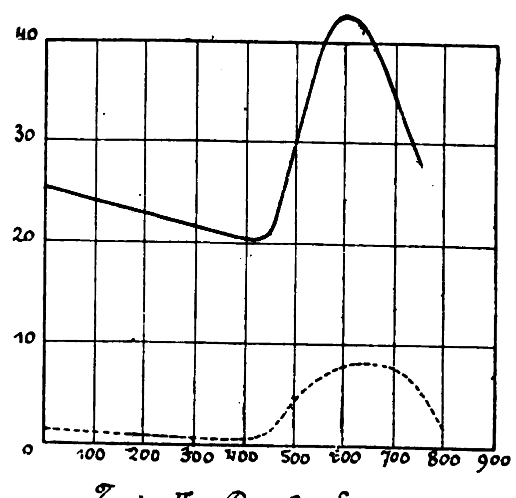


Fig. 151.

La différence entre la charge de rupture du métal brut de coulée et celle du métal trempé à la température la meilleure est d'autant plus accentuée que la teneur en cuivre est plus faible.

Quoi qu'il en soit, on doit conclure que la trempe des bronzes faite entre 600 et 800° améliore considérablement les résultats des essais à la traction.

Il faudrait voir l'influence de ce traitement sur le frotte-

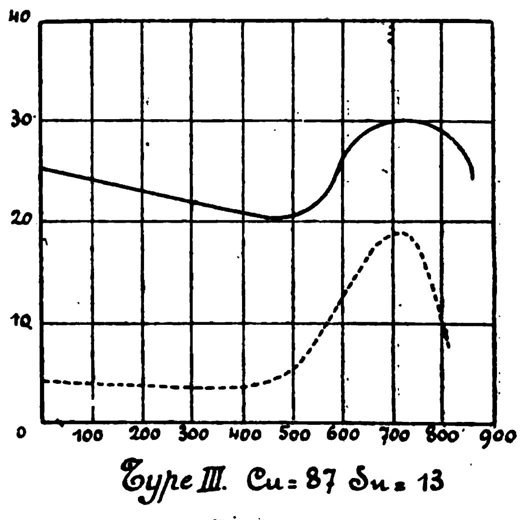


Fig. 152.

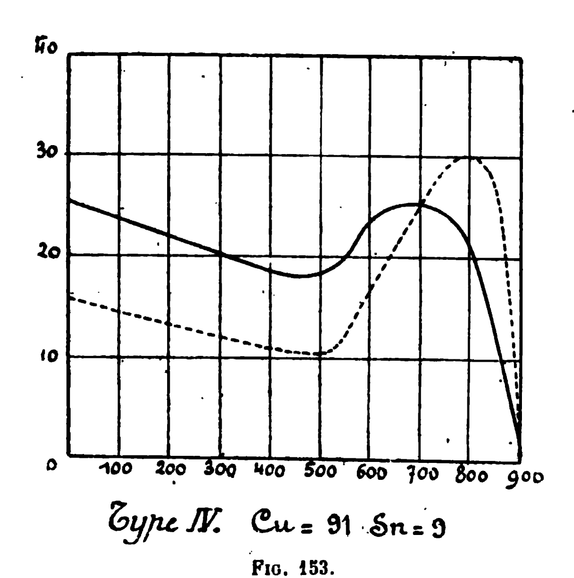


Fig. 153.

ment. Il ne faut pas oublier, en effet, que la trempe fait dis-

paraître le composé ɛ, corps très dur qui doit jouer un rôle important dans les coussinets.

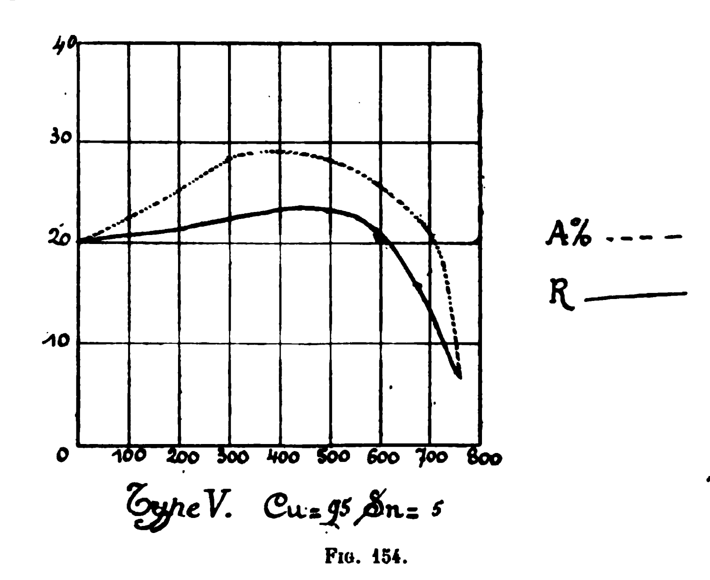


Fig. 154.

C'est une étude de longue haleine que nous nous proposons de faire prochainement.

UTILISATIONS [1]

On peut diviser les bronzes ordinaires, suivant leur utilisation, en cinq classes principales :

1° Bronzes pour constructions mécaniques ;

2° Bronzes pour canons ;

3° Bronzes pour cloches ;

4° Bronzes pour miroirs ;

5° Bronzes pour statues.

Il est toujours bien entendu qu'il n'est question pour le moment que des alliages cuivre-étain. Les emplois des

1. A titre de documents, nous donnons quelques micrographies de bronzes ordinaires industriels (Album, Pl. XLVI et XLVII).

bronzes spéciaux relèvent du chapitre suivant. Toutefois, la plupart des bronzes contiennent des quantités plus ou moins importantes de zinc. Nous donnerons donc ici les applications de ces alliages ternaires, renvoyant au chapitre suivant pour l'étude de l'influence de cet élément.

1° Bronzes pour constructions mécaniques. — Ces bronzes peuvent être divisés en deux groupes :

1° *Bronzes servant à des pièces travaillant principalement au frottement* (coussinets, par exemple) ;

2° *Bronzes servant à des pièces soumises à des efforts autres que le frottement* (engrenages, par exemple).

Les bronzes pour coussinets contiennent ordinairement :

Cu	81 à 87 0/0
Sn	19 à 13 0/0

Les compositions varient suivant les charges à supporter, les conditions de frottement (tel bronze conviendra pour rouler sur acier cémenté-trempé et ne conviendra nullement pour rouler sur acier demi-dur) et avec les autres conditions de travail ; c'est ainsi qu'un coussinet peut, tout en étant soumis principalement à des efforts de frottement, avoir à subir des chocs ; il en est ainsi pour les coussinets des têtes de bielle de moteur à pétrole.

Nous traiterons complètement cette question du bronze à frottement dans le chapitre suivant, alors que nous aurons défini les bronzes spéciaux utilisés dans le même but.

Mais d'ores et déjà nous donnerons les principales compositions d'alliages cuivre-étain et cuivre-étain-zinc employés pour coussinets.

Bronzes ordinaires pour coussinets. — *Bronze très dur :*

Cu	81
Sn	17
Zn	2

ou :

Cu	82
Sn	17
Zn	1

ou encore :

Cu	82
Sn	18

Voici l'analyse d'un bronze répondant à cette qualité :

Cu	82,99
Pb	0,26
Zn	traces
Sn	15,90
Fe	0,30

Bronze dur :

Cu	84
Sn	14
Zn	2

ou

Cu	84
Sn	12
Zn	4

Les deux analyses suivantes correspondent sensiblement à ces deux types :

1°	Cu	84,3
	Sn	14,2
	Zn	0,8
	Fe	0,15
	Pb	0,33
		99,78
2°	Cu	84,9
	Sn	12,5
	Zn	2
	Fe	0,21
	Pb	0,25
		99,86

Il est bien évident que le fer et le plomb doivent être regardés comme des impuretés.

On utilise souvent des alliages à plus hautes teneurs en zinc. Nous citerons quelques-uns des types les plus répandus et leurs emplois :

Coussinets pour axes de locomotive :

Cu	82
Sn	10
Zn	8

Coussinets pour axes de wagon :

Cu	75
Sn	21
Zn	4

On remarquera la très faible teneur en cuivre de cet alliage.

Parfois même la teneur en cuivre descend jusqu'à 70 0/0 comme dans ce type pour :

Coussinets d'essieux :

Cu	70
Sn	22
Zn	8

Généralement la teneur en étain est plus forte dans les bronzes destinés au frottement circulaire qu'à ceux destinés au frottement alternatif.

En France, les types adoptés par les Compagnies de chemins de fer sont généralement :

Cu	82
Sn	16
Zn	2

pour pièces soumises à des frottements continus;

Cu	84
Sn	14
Zn	2

pour pièces à frottement alternatif.

Bronzes d'engrenages. — Les bronzes d'engrenages sont presque tous des bronzes phosphoreux ; nous en parlerons dans le chapitre suivant. On peut toutefois ajouter qu'ils se rapprochent généralement des types :

Cu	88 à 91
Sn	12 à 9

Nous avons déjà étudié les propriétés de tels bronzes.

AUTRES BRONZES POUR CONSTRUCTIONS MÉCANIQUES. — Nous donnerons ici les principaux types de bronze utilisés pour les constructions mécaniques autres que ceux employés pour coussinets et engrenages. On verra que tous ces bronzes renferment du zinc.

Robinets :

Cu	88
Sn	10
Zn	2

ou :

Cu	88
Sn	8
Zn	4

Boîtes à étoupes :

Cu	86
Sn	11
Zn	3

ou :

Cu	81
Sn	3
Zn	13
Pb	3

Boîtes de roue de wagon :

Cu	88
Sn	10
Zn	2

Sifflets à vapeur :

Cu	81
Sn	17
Zn	2 (son clair)

ou :

Cu	80
Sn	18
Zn	2 (son plus sourd)

Segments de piston :

Cu	88
Sn	3
Zn	9

Un bronze qui est parfois employé pour segments de piston contient du plomb; nous en donnerons la composition au chapitre suivant; en général, d'ailleurs, on utilise, pour cet usage, de la fonte: c'est notamment ce que l'on fait dans les moteurs d'automobiles.

Les bronzes pour décolletage sont d'un emploi relativement restreint. Ils ont été ordinairement laminés, puis étirés. C'est dire qu'ils renferment généralement au moins 90 0/0 de cuivre, au plus 10 0/0 d'étain. Les types les plus courants sont :

Cu	96
Sn	4

et:

Cu	92
Sn	8

Ils sont presque toujours épurés au phosphore.

2° **Bronzes à canons.** — On sait que le métal utilisé à l'heure actuelle pour les canons est l'acier au nickel, à assez faible dose de carbone et renfermant 2 à 3 0/0 de nickel.

Il ne semble pas cependant dépourvu d'intérêt de rappeler ce qu'étaient les brones à canons.

Disons de suite qu'il y a une grande analogie entre ces alliages et ceux utilisés pour la confection des engrenages.

En effet les bronzes à canons renfermaient tous (à l'exception de l'un des types adoptés par la Chine) :

Cu	88 à 92
Sn	12 à 8

Voici d'ailleurs les principaux types :

ORIGINE	Cu	Sn	Zn	Fe	Pb
Artillerie française	90,73	9,27	»	»	»
— —	90,09	9,90	»	»	»
— allemande	90,91	9,09	»	»	»
— anglaise	91,74	8,26	»	»	»
— —	91,80	8,20	»	»	»
— américaine	90,00	10,00	»	»	»
— —	90,27	9,73	»	»	»
— russe	88,61	10,70	»	0,69	»
— chinoise	77,18	3,42	5,02	1,16	13,22
— —	93,17	5,43	»	1,38	»

On voit que les bronzes à canons adoptés par les différentes nations n'étaient formés généralement que de cuivre et d'étain et qu'en somme ils se rapprochaient beaucoup du type

Cu	90
Sn	10

Il est certain que le bronze à canons a été l'un des alliages cuivre-étain le plus étudié. Il faut que le métal destiné à la confection des pièces à canons soit susceptible de résister à la forte pression qui est développée au moment où le coup part ; il doit donc posséder une haute charge de rupture. De plus, il ne doit pas se déformer, il lui faut une grande élasticité. Il faut encore qu'il possède une certaine dureté ; le projectile, au moment du départ, exerce un frottement très violent sur la paroi du canon. Enfin le métal à canons doit résister à l'action des gaz qui prennent naissance dans la combustion de la poudre. Il faut, en résumé, que le métal à canons possède une charge de rupture élevée, une haute limite élastique, une certaine dureté et une certaine résistance à l'attaque chimique.

Les teneurs en cuivre et étain que nous avons indiquées sont celles qui répondent le mieux à ces désidérata ; quand on met des quantités plus importantes d'étain, on a bien un métal

plus dur et plus fusible et, par conséquent, plus facile à couler, mais beaucoup moins élastique et bien plus fragile.

De plus, l'hétérogénéité du métal solidifié augmente avec la teneur en étain.

Mais, si la composition est le facteur le plus intéressant pour l'obtention d'un bon métal à canons, les conditions de fusion, de coulée, de refroidissement et même le traitement sont cependant des plus importants. Il faut avant tout que le métal soit homogène, et c'est à ce résultat que devait tendre toute la fabrication; on cherchait donc à produire le métal fondu aussi homogène que possible et à le refroidir avec une vitesse uniforme dans toute la masse.

Pour les coulées, on opérait de la façon suivante :

Les moules étaient placés verticalement. On coulait une quantité de métal bien supérieure à celle nécessaire pour la pièce elle-même, de façon à former une énorme masselotte que l'on séparait ultérieurement pour être refondue; de cette façon on uniformisait la composition du métal, qui était généralement très différente dans le haut et dans le bas du lingot.

La solidification se faisait rapidement, de façon à éviter la liquation. Ceci explique l'emploi des moules de fer.

Ce perfectionnement ne remonte qu'au siège de Paris; à cette époque une Commission du Génie civil avait été créée et fonctionnait au Conservatoire des Arts et Métiers. Elle avait, entre autres, comme mission, la surveillance de la fabrication des armes. Voici ce que dit Knab des essais qui furent faits à cette époque :

« Les fondeurs transformèrent leurs fours et leurs fosses et les mécaniciens leurs machines à outils pour fondre les canons, pour les percer, les aléser, les tourner, les rayer et les ajuster. On s'aperçut que le métal à canons classique ne possédait pas l'homogénéité et la ténacité désirables. C'est alors que MM. Laveissière, fondeurs à Saint-Denis, imaginèrent de fondre non plus en sable, mais dans des coquilles, c'est-à-dire dans des moules métalliques s'ouvrant en deux parties de haut en bas.

« Le métal ne fut plus le même; la coquille amena un refroidissement assez rapide vers l'extérieur, qui s'étendit vers le centre, de sorte que la solidification du métal se traduisit par des cristaux horizontaux allant vers le centre, à la rencontre les uns des autres; les taches d'étain disparurent, l'homogénéité et, par suite, la ténacité augmentèrent.

« Les premières pièces, cependant, donnèrent de médiocres résultats avec un métal bien amélioré; c'est alors qu'on s'aperçut que la coulée en coquille avait eu pour effet d'aggraver un défaut qui se manifestait entre les tourillons et la culasse placée à la partie inférieure. La solidification au-dessous des tourillons, à l'origine de la volée, avait été précipitée par la forme de la pièce de sept et surtout par la lingotière, de sorte qu'il s'était formé une espèce de barrage, alors que la partie inférieure, plus grosse, était encore liquide. La masselotte ne pouvait donc plus fournir de métal au fur et à mesure que le retrait s'opérait vers la culasse, en partant des deux parties en saillie des tourillons.

« MM. Laveissière firent le contraire de ce qui se faisait depuis deux cents ans. Ils placèrent la culasse en l'air au lieu de la mettre en bas; ils augmentèrent la grosseur de la masselotte pour en réduire la hauteur à $0^m,50$, c'est-à-dire au tiers seulement de ce qu'elle était. En opérant de la sorte et grâce à la forme conique évasée de bas en haut comme un entonnoir, la solidification commence par le bas, le métal liquide peut alimenter toutes les sections inférieures au fur et à mesure qu'elles se solidifient, pourvu qu'on ait soin de fournir du métal à la masselotte, recouverte d'une couche de charbon de bois, pour la protéger de l'oxydation; toutes les pièces de sept donnèrent un métal supérieur, avec des qualités mécaniques sans précédent.

« Quand on fut certain de la supériorité des produits obtenus, les ateliers de Saint-Denis, pourvus de trois moules métalliques purent, avec un personnel de dix hommes, fondre sept canons par jour. »

Henri Tresca, président de la Commission du Génie civil, a

présenté à l'Académie des Sciences, en mai 1873, une note sur les propriétés mécaniques de trois bronzes à canons : le bronze ordinaire, le bronze au phosphore de Bourges et le bronze Laveissière du siège de Paris, dont les spécimens étaient alors envoyés à l'Exposition internationale de Vienne.

Les trois échantillons essayés avaient la composition chimique suivante :

COMPOSITION	BRONZE ORDINAIRE	BRONZE AU PHOSPHORE [1]	BRONZE LAVEISSIÈRE
Cuivre	89,87	90,60	89,47
Etain	9,45	8,82	9,78
Zinc	0,31	0,27	0,66
Plomb	0,37	0,31	0,69
	100,00	100,00	100,00

1. Aucune indication n'est donnée sur le phosphore qui pouvait rester.

Voici les résultats comparatifs des essais des trois métaux :

1° Le coefficient d'élasticité est augmenté de 1/10 pour le bronze au phosphore et de 1/5 pour le bronze Laveissière ;

2° La limite d'élasticité, la même pour les deux premiers, est de 1/4 en plus pour le métal Laveissière ;

3° La charge de rupture étant 1 pour le bronze ordinaire à canons, elle a été 1,31 pour le bronze au phosphore et 1,57 pour le bronze du siège ; la résistance de ce dernier a donc augmenté de plus de moitié ;

4° Les allongements à la rupture ont été respectivement 1 ; 1,29 et 4,85, c'est-à-dire presque quintuplés pour le métal Laveissière ;

5° Le travail mécanique de rupture, c'est-à-dire la valeur en kilogrammètres du travail nécessaire pour amener les barres au point de rupture, se trouve donc aussi augmenté de 1 à 2 et de 1 à 7.

Certaines fabriques coulaient les pièces pleines; l'âme de la pièce était obtenue par perçage ultérieur. D'autres usines coulaient le bronze autour d'un noyau en fer à circulation d'eau. On a utilisé dans les arsenaux autrichiens un procédé de traitement du bronze à canons connu sous le nom de bronze d'acier, ou de bronze *Uchatius*, du nom de son inventeur.

Ce bronze était du type :

Cu	92
Sn	8

Le tube était soumis à un traitement mécanique spécial.

On coulait d'abord un canon plein, puis on le perçait à un diamètre moindre que celui qu'il devait avoir; l'élargissement était obtenu au moyen de mandrins cylindro-coniques. Enfin l'âme était en quelque sorte laminée par un procédé spécial de façon à augmenter la résistance là où les efforts les plus grands devaient s'exercer.

Il faut toutefois remarquer que le métal ainsi traité devait posséder des tensions internes très fortes qui pouvaient nuire à la résistance au choc.

Au lieu du mandrinage, on a utilisé la pression intérieure par l'intermédiaire du suif.

Enfin nous devons signaler que de nombreux essais ont été faits avec des alliages spéciaux, qui relèvent du chapitre suivant.

En résumé, le métal à canons, qui ne présente qu'un intérêt rétrospectif, est du type

Cu	88 à 92
Sn	12 à 8

Sa préparation est faite avec des soins particuliers nécessaires à l'obtention d'un métal aussi homogène que possible.

3° **Bronzes pour cloches.** — La qualité requise d'un bronze à cloches est la pureté de ton.

Ceci n'est donné que par un alliage d'une homogénéité par-

faite, d'une grande dureté et possédant une résistance élevée.

Les bronzes employés rentrent presque tous dans les types suivants :

Cu....................	75 à 80 0/0
Sn....................	25 à 20 0/0

Il y a cependant, comme nous l'indiquons plus loin, des alliages à plus haute et à plus faible teneur en cuivre, employés parfois pour le même usage.

Rappelons tout d'abord les propriétés de ces alliages renfermant de 75 à 80 0/0 de cuivre. Ils sont fragiles, lorsqu'ils ont été refroidis lentement, et cela même après un recuit au rouge cerise ; ils donnent une cassure à grain fin.

Portés au rouge et trempés à l'eau, ils s'adoucissent très nettement ; ils peuvent alors être travaillés aisément, voire même martelés.

Pour leur donner à nouveau une grande dureté, il suffira de les réchauffer au rouge cerise et de les refroidir lentement.

La préparation du métal de cloches est beaucoup plus aisée que celle du métal à canons ; l'alliage est, en effet, beaucoup plus fluide.

On fond toujours le cuivre en premier, puis les résidus que l'on veut refondre et on ajoute, à la fin et généralement pas portions successives, l'étain.

La coulée d'une cloche est une opération parfois délicate lorsque ses dimensions sont importantes.

Overmon, dans *le Guide du Fondeur*, en donne la description suivante :

« Le moule est installé dans la fosse. Le noyau est bâti en briques sur une plate-forme en fer, il est recouvert d'une couche de terre de 20 à 25 millimètres d'épaisseur ; on finit par une composition d'argile et de brique pilée finement pulvérisée. Cette dernière est mélangée avec du crottin de cheval, auquel on ajoute un peu de sel ammoniaque. Sur le noyau, la chemise est en sable argileux, mais elle est encore recouverte d'argile fine pour donner une surface polie. Les orne-

ments, qui ont été préalablement moulés dans la cire, le bois ou le métal, sont fixés sur la chemise au moyen de cire, de glu, ou de toute autre matière. Si les ornements sont de nature à empêcher le démoulage du manteau, — car le manteau ne peut pas être dévissé ; — ils sont fixés à la chemise par du suif ou un mélange de suif et de cire. Un peu de chaleur communiquée au moule fondra le suif, et les ornements pourront être retirés lorsque le manteau aura été séparé du noyau. La chemise doit être bien polie, on ne doit employer aucun charbon, le tout étant légèrement saupoudré avec des cendres de bois. Entre le noyau et la chemise, on fait également un lit de cendres. Pour former le manteau, on enduit le noyau avec une bouillie d'argile, de briques pilées et de crottin de cheval ; par dessus, on met de la terre, puis de la terre mélangée de paille. La couronne de la cloche est moulée avec un modèle en bois après que le trousseau est retiré. Le crochet de fer pour le marteau est placé dans le creux laissé par le trousseau, il se trouvera ainsi pris dans le noyau et rentrera dans l'épaisseur du métal de la cloche. La paroi du moule doit être finie lorsqu'on retire le manteau. Il peut y avoir de petits défauts qui ne sont pas très importants ; l'excès du métal en ces endroits est enlevé après que la cloche est coulée. Dans le finissage du moule, on doit s'efforcer d'obtenir un saupoudrage uniforme des cendres. Lorsque le moule est parfaitement sec, il est prêt à être employé. Le noyau peut être rempli avec du sable ; mais il n'y a aucun danger à le laisser ouvert, car, le métal pour cloches ne dégageant pas beaucoup de gaz, il n'y a pas à craindre d'explosion.

« Le manteau est, dans une certaine mesure, armé en fer ; mais la principale précaution est de bien tasser le sable de la fosse. Le trou de coulée est sur le haut de la cloche, ou dans la couronne, ou, si cette dernière est ornementée, sur un côté. Les masselottes sont inutiles ; le métal étant purifié avant la coulée, il n'y a aucun danger de cendrure[1]. »

1. Cette description, bien qu'ancienne, correspond assez bien à la pratique des fonderies modernes.

Les petites sonnettes sont fréquemment coulées dans des moules en fonte.

Certains alliages utilisés pour la fabrication des tam-tam et des gongs chinois ne doivent leur ton très fort, non pas tant à leur composition chimique qu'au traitement mécanique qu'ils ont subi. En effet, dès que la pièce est solidifiée, alors qu'elle est encore rouge, on la trempe dans l'eau froide et on la martèle.

Les tam-tam et les gongs chinois sont donc, fait remarquer A. Krupp, des cloches forgées. A l'heure actuelle, on procède autrement : M. Riche a montré, en effet, que la trempe laisse toujours ces alliages dans un certain état instable parfois très nuisible. Au contraire, si on porte ce bronze à la température du rouge sombre, il se travaille très aisément, il se lamine même aisément, comme on le sait, et on peut l'emboutir.

On a souvent signalé qu'en refondant des cloches on obtient un métal d'un son très désagréable. Ceci est dû à la formation d'oxydes métalliques qui se dissolvent ou s'interposent dans le métal.

Il suffit de traiter un tel métal par une quantité convenable d'un réducteur quelconque pour détruire ces oxydes ; le phosphore, le manganèse, l'aluminium, le silicium sont tout indiqués. Il faut seulement avoir bien soin d'éviter un excès qui peut nuire au son du métal.

Voici, en partant des alliages les plus riches en cuivre, les compositions les plus usitées comme bronzes à cloches. On remarquera que certains de ces bronzes contiennent un peu de zinc, de plomb, d'argent ou de fer, voire même d'antimoine.

Cloches musicales et métal à grelots :

Cu	83 et 84
Sn	17 à 16

Gongs :

Cu	82
Sn	18

Cloches ordinaires :

Cu	78 à 80
Sn	22 à 20

Tam-Tam :

Cu	78,5
Sn	20,3
Pb	0,5
Ag	0,15
	99,45

ou :

Cu	78
Sn	22

Grandes cloches :

Cu	76
Sn	24

Beffroi de Rouen :

Cu	76,1
Sn	22,3
Zn	1,6
Ag	0,6
	100,6

Cloches d'horloges suisses :

Cu	74,5
Sn	25
Pb	0,5

Sonneries de pendule :

Cu	72
Sn	26,5
Ag	1,5

Karakanes japonais:

Cu	70
Sn	19
Zn	3
Pb	8
Cu	64
Sn	24
Zn	9
Pb	3
Cu	61
Sn	18
Zn	6
Pb	12
Fe	3

On emploie également des alliages à très faibles teneurs en cuivre. Hiorns cite les types :

Cu	40
Sn	60

et

Cu	17
Sn	83

employés le premier pour des petites sonnettes donnant un son argentin très pur, le second pour des sonnettes de table.

Enfin Krupp donne la composition du métal d'Alger, qui possède une couleur d'un blanc très pur et est susceptible de prendre un très beau poli :

Cu	5
Sn	94,5
Sb	0,5

Nous laissons aux auteurs cités la responsabilité de ces trois dernières compositions.

En résumé, le véritable type du métal à cloches rentre dans la composition :

Cu	75 à 80
Sn	25 à 20

Nous avons indiqué les propriétés spéciales de ces alliages et le traitement qui permet d'atteindre le but voulu.

4° **Bronzes pour miroirs.** — Comme le bronze à canons, les bronzes pour miroirs ne présentent guère qu'un intérêt historique. Ils étaient encore usités, il y a peu de temps, dans la construction de certains instruments d'optique.

Partout, à l'heure actuelle, on emploie le miroir en verre.

Pour qu'un métal puisse être utilisé pour la confection des miroirs, il faut qu'il soit susceptible de prendre un beau poli : pour cela, il doit posséder une grande dureté, avoir une cassure très fine; il doit également avoir une belle couleur blanche. Quelquefois, on le dore pour le rendre inoxydable sans diminuer son pouvoir réfléchissant.

La composition répondant le mieux à ces désidérata (hormis la dorure) est la suivante :

Cu........................	65 à 70
Sn........................	35 à 30

On a souvent cherché à faire à cet alliage des additions permettant d'en augmenter la dureté; mais elles nuisent toutes (arsenic, antimoine, nickel) au brillant du miroir.

Les principaux types de bronze à miroirs sont les suivants :

Réflecteur du télescope de Birr-Castle (Irlande), pesant 5 tonnes :

Cu...........................	70,3
Sn...........................	29,1
Impuretés....................	0,6

Alliage le plus usité :

Cu............................	68
Sn............................	3

Alliage dit d'Ohio :

Cu...........................	68,5
Sn...........................	31

c'est le plus blanc parmi ces alliages.

Grand télescope de lord Ross :

Cu	68,21
Sn	31,79

Alliage assez courant :

Cu	66,6
Sn	33,4

Réflecteur du Polytechnicum de Brunswick :

Cu	65,2
Sn	34,8

Miroir romain :

Cu	63,39
Sn	19,05
Pb	17,25

On a signalé des miroirs trouvés en Égypte et renfermant 85 0/0 de cuivre et 15 0/0 d'étain.

Nous étudierons plus loin d'autres bronzes à miroir renfermant du nickel, du platine, etc.

4° **Bronzes de statue.** — On a employé pendant longtemps comme bronzes de statues des alliages de cuivre et d'étain Mais depuis quelque temps on utilise des alliages ternaires : cuivre, étain, zinc, qui sont en quelque sorte intermédiaires entre les bronzes et les laitons. Cette addition de zinc s'explique par la nécessité d'avoir un métal très fluide qui se travaille à la lime et qui prend à l'air une belle patine.

Le laiton seul n'offrirait pas une dureté assez grande pour pouvoir être ciselé.

Les compositions les plus usitées sont :

Cu	90 à 78
Sn	2 à 4
Zn	10 à 18 0/0

La variation que l'on apporte dans la composition a pour but surtout de faire changer la couleur. Mais il ne faut avoir ni un excès d'étain qui rendrait le métal fragile, ni un excès de zinc qui diminuerait sensiblement la couleur et la patine du bronze.

La fusion du bronze à statue demande de grandes précautions au point de vue oxydation; nous avons déjà parlé de ce point pour les bronzes utilisés dans les constructions mécaniques. Quant au moule, il est obtenu généralement par le procédé dit des pièces battues. La préparation de ces moules est certainement la partie la plus délicate de l'art du mouleur.

Souvent, dans la fabrication des statues, on fait d'abord couler le métal dans une cuve, analogue aux poches de coulée de l'acier, qui permet aux impuretés de se rassembler à la surface. Le trou de coulée de cette poche se trouve, bien entendu, au fond de la poche. Le métal est toujours versé de façon à atteindre l'endroit le plus profond du moule et à être soulevé par le métal en fusion qui coule ensuite.

Voici les principaux alliages utilisés pour la confection des statues; ils renferment parfois du plomb.

Alliages jaune rouge :

Cu	86,6
Zn	3,3
Sn	6,6
Pb	3,3
	99,8

Cu	84,5
Zn	11,2
Sn	4,3

Alliages rouge orange :

Cu	83
Zn	12
Sn	5

Alliages jaune orange :

Cu	75 à 81
Zn	20 à 25
Sn	3 à 4

Alliages orange clair :

Cu	73
Zn	23
Sn	4

Alliages jaune clair :

Cu	65 à 70
Zn	32 à 27
Sn	3

Un grand nombre de ces alliages se rapprochent beaucoup plus des laitons (alliages de cuivre et de zinc) que des bronzes.

Nous donnons la composition du bronze de quelques statues importantes.

Statue trouvée à Athènes :

Cu	72
Sn	24
Pb	4,6
Zn	2
	102,6

Statue de Louis XIV (Paris, 1699) *:*

Cu	91,40
Sn	1,70
Zn	5,53
Pb	1,35
	99,98

Statue de Henri IV (Pont-Neuf, Paris, 1817) :

Cu	89,2
Sn	5,0
Zn	3,5
Pb	1,2
	98,9

Statue du Grand Électeur à Nuremberg :

Cu	88,6
Sn	5,2
Zn	0,1
Pb	4,5
	98,4

Statue de Napoléon (*place Vendôme*, Paris, 1833) :

Cu	84,8
Sn	5,8
Zn	6,0
Pb	2,7
	99,3

Colonne Vendôme (*bronze de canons*) :

Cu	89,16
Sn	10,24
Zn	0,102
Pb	0,240
Fe + Ag	0,498
	100,240

Colonne de Juillet :

Cu	91,40
Sn	1,90
Zn	5,53
Pb	1,37

Lion de Brunswick :

Cu	81
Sn	6,5
Zn	10
Pb	2,5

D'après Knab, les alliages employés par M. Thiébaut ont pour composition :

Cu	82,5
Sn	4
Zn	10,5
Pb	3

pour les bronzes d'appartement ;

Cu	82,5
Sn	6
Zn	8,5
Pb	3

pour les statues qui doivent être placées sur la voie publique; cet alliage prend plus rapidement une belle patine que le premier.

Toujours d'après le même auteur, la composition du bronze utilisé par M. Barbedienne est la suivante :

Cu	90
Sn	3,5
Zn	6,5
Pb	traces

5° **Bronzes pour médailles et monnaies.** — Le bronze s'est substitué au cuivre pour la confection des médailles et des monnaies. Il s'use, en effet, beaucoup moins rapidement. Il faut que le bronze employé possède une certaine malléabilité, puisqu'il doit être estampé.

Les types de bronzes pour monnaies ou médailles sont :

Cu	90 à 96
Sn	10 à 4

Plus le pourcentage d'étain est élevé, plus le bronze est dur.

Pour ceux qui renferment 8 0/0 d'étain et plus, il faut les tremper au rouge cerise pour pouvoir les estamper.

Les principaux types utilisés sont :

Médailles ayant beaucoup de relief :

Cu	97
Sn	2
Zn	1

Médailles fines :

Cu	92
Sn	8
Zn	traces

On ajoute parfois un peu de zinc et de plomb.

Alliage adopté en France pour la monnaie de billon et utilisé encore aujourd'hui :

Cu	95
Sn	4
Zn	1
Tolérance pour le cuivre	1 0/0

Cet alliage se travaille bien à froid. Il est seulement nécessaire de le recuire de temps en temps.

6° **Bronze pour dorures.** — Ce bronze, que l'on désigne souvent à tort sous le nom d'or fondu, possède une couleur doré et est destiné à être recouvert d'une mince couche d'or. Il est utilisé souvent pour la préparation d'objets artistiques (statuettes, chandeliers, parures, etc.).

C'est également cet alliage qui est utilisé pour faire l'*émail cloisonné*. Dans des plaques de ce métal, on fait de légères cavités dans lesquelles on place l'émail à fondre. On porte le tout à une température suffisamment élevée pour le fondre.

Enfin ce métal est utilisé particulièrement pour la confection de l'objet dit de Paris.

Les principales compositions employées pour le bronze à dorure sont :

1° *Bronze pour objets de Paris :*

Cu	94
Sn	6

2° *Bronze à bas prix possédant une belle couleur or :*

Cu	90,5
Sn	6,5
Zn	3

3° *Bronze chrysocale :*

Cu	95
Sn	5

4° *Autres types :*

Cu	70 à 82
Sn	2 à 3
Zn	25 à 18
Pb	3 à 1,50

5° *Bronze à faible teneur en cuivre :*

Cu	58,3
Sn	16,7
Zn	25,3

Cet alliage, qui possède par lui-même une couleur se rapprochant de celle de l'or, ne nécessite qu'une faible couche de dorure.

III. — CONCLUSIONS

En résumé, les alliages étain-cuivre industriels sont :

1° Pour les *constructions mécaniques*, ceux renfermant 81 à 87 0/0 Cu pour les pièces soumises à des frottements.

Ils sont formés, après refroidissement lent, de la solution α + le corps δ (Cu^4Sn).

Plus il y a d'étain, plus ce dernier constituant est en abondance; plus aussi il y a de dureté et de fragilité, ceci en admettant même vitesse de refroidissement pour l'alliage coulé.

Ceux contenant de 88 à 91 0/0 de cuivre sont utilisés pour des pièces soumises à des chocs, tels que les engrenages.

Ils sont constitués après refroidissement lent, par la solution α avec des quantités très faibles du corps δ (Cu^4Sn).

La solution α apporte, avec elle, les allongements, la non-fragilité; le corps δ donne de la dureté.

A noter sur ces bronzes l'importance d'une trempe entre 550 et 750°, laquelle transforme le métal qui, après cette opération, est formé de solution α et de solution β.

2° L'ancien *bronze à canons* (Cu = 90) rentre dans la catégorie que nous venons d'étudier ;

3° Les *bronzes à cloches* renferment ordinairement de 75 à 80 0/0 de cuivre; parfois même on descend jusqu'à 70 et même 61 0/0 de cuivre, mais en présence de zinc.

Exceptionnellement on utilise des alliages où l'étain domine (Cu = 40 et Cu = 17).

De 80 à 75 0/0 de cuivre, les constituants des bronzes sont

toujours la solution α et le corps δ (Cu^4Sn); mais il y a beaucoup plus de ce dernier que du premier.

Quant aux alliages à 40 0/0 et à 17 0/0 de cuivre, ils sont formés tous deux des constituants η (Cu^3Sn), H (CuSn) et d'étain. Ils sont très brisants, le constituant η amenant avec lui une grande fragilité.

4° Les *anciens bronzes pour miroirs* renfermaient de 65 à 70 0/0 Cu. Ils sont formés des deux constituants δ (Cu^4Sn) et η (Cu^3Sn). C'est le constituant η qui leur donne la faculté de se polir.

5° Les *bronzes de statues* contiennent tousdu zinc, même du plomb; il est donc bien difficile de parler de leur constitution, dans l'état actuel de nos connaissances sur ces alliages complexes.

6° Les *bronzes pour médailles et monnaies* contiennent beaucoup de cuivre, quand ils sont destinés à avoir un important relief. Ils ne contiennent alors que de la solution α ou, du moins, que de très faibles quantités du corps δ.

Pour la monnaie courante, on utilise des alliages semblables.

En *conclusion*, on a des bronzes à solution α lorsqu'on veut un alliage très plastique, des bronzes à solution α et à corps δ bronzes mécaniques, lorsqu'on veut en même temps de la dureté et, si l'on a besoin de non-fragilité, on fera en sorte que α domine ; si l'on veut une grande résistance à l'usure, on cherchera à avoir δ en quantité suffisante.

On ne se mettra en présence d'autres constituants (η, H) que pour des usages très spéciaux (miroirs, clochettes).

A noter enfin que, parmi ces bronzes, les seuls faciles à laminer et étirer sont ceux formés de la solution α, que cependant on peut arriver à laminer des bronzes contenant de très faibles quantités du corps δ (Cu = 90 à 92 0/0); mais, dès que δ prend une certaine importance, il faut travailler le métal à chaud (Cu = 82).

Il y a donc une relation directe entre le travail des bronzes et leur constitution.

IV. — TYPES DE CAHIERS DES CHARGES POUR LE CUIVRE

CHEMINS DE FER FRANÇAIS

BARRES EN CUIVRE ROUGE POUR ENTRETOISES ET RIVETS

CHAPITRE I

CONDITIONS GÉNÉRALES

Fabrication. — Aspect. — Texture. — Le cuivre rouge employé doit être de première qualité, équivalente à celle dite « Corocoro », affiné avec le plus grand soin, parfaitement homogène et très malléable ; il doit être aussi pur que possible.

La proportion totale des matières étrangères : métaux, oxydes, arsenic, soufre, ne devra pas dépasser 0,004.

Les lingots devront être sains et exempts de criques, fissures, etc. Avant et après le dégrossissage au laminoir, la surface de ces lingots sera nettoyée au burin, s'il y a lieu, pour enlever les pailles, soufflures et autres défauts apparents.

Les rondins dégrossis, qui proviennent de lingots coulés verticalement, seront éboutés aux deux extrémités pour éliminer les deux parties sujettes aux retassures.

Les barres présenteront une surface parfaitement nette, exempte de pailles, fentes, piqûres ou autres défauts.

Les barres pour entretoises seront, suivant les indications des commandes, ou pleines, ou creuses; ces barres seront calibrées sur toute leur longueur ; elles ne devront pas être recuites après le dernier étirage, afin que leur surface soit assez dure pour supporter le filetage.

Les barres autres que celles pour entretoises seront recuites ou non, suivant les indications de la commande.

Toutes les barres pour entretoises seront bien droites.

Elles seront présentées incisées circulairement à 50 millimètres de l'une des extrémités, au tour ou à la scie, sur une profondeur de 3 à 4 millimètres, l'autre bout étant coupé d'équerre à la scie.

Les barres autres que celles pour entretoises seront coupées d'équerre à la scie, aux deux extrémités.

Tolérances sur les diamètres et sur les épaisseurs. — Les tolérances admises au maximum sont limitées pour les diamètres et les épaisseurs à :

$0^{mm},1$ en plus ou en moins pour les barres pour entretoises. L'ovalisation ne pourra dépasser cette limite ;

$0^{mm},2$ en plus ou en moins pour les autres barres. Il sera, en outre, accordé sur le diamètre du trou des barres creuses pour entretoises, une tolérance de $+ 0$ et $- 1^{mm},5$. L'ovale du trou est limitée à $1^{mm},5$.

Toute variation de diamètre ou d'épaisseur dépassant ces limites pourra donner lieu au rebut des barres.

CHAPITRE II

NATURE ET PROPORTION DES ESSAIS

Nature des essais. — Les essais auxquels seront soumises les barres sont les suivants :

Essai de texture. — Sur les barres pour entretoises;

Essai de traction. — Sur les diverses barres (entretoises et rivets) ;

Essai de pliage. — Sur bouts filetés (pour barres d'entretoises);

Sur bouts non filetés (pour barres à rivets);

Essai de poinçonnage. — Sur les barres pour entretoises.

Il pourra, en outre, être fait un essai chimique pour déterminer la proportion des matières étrangères.

Proportion des essais. — Il sera fait un essai de traction et de pliage par 500 kilogrammes ou par lot inférieur à 500 kilogrammes. L'essai de texture et l'essai de poinçonnage auront lieu sur toutes les barres pour entretoises.

CHAPITRE III

MODES D'ESSAIS. — RÉSULTATS A OBTENIR

Condition générale. — Les résultats à obtenir, indiqués ci-après dans chaque essai, sont des minima absolus.

Toute épreuve qui ne remplira pas complètement les conditions fixées pourra donner lieu au rebut du lot correspondant.

Essais de texture. — Les barres pour entretoises incisées à une extrémité, comme il est dit au chapitre I, seront rompues au droit de cette incision.

La cassure doit présenter une texture parfaitement homogène d'une couleur rosée, soyeuse, à grains fins.

Essai de traction. — *Forme des éprouvettes.* — Les éprouvettes seront cylindriques.

Les têtes d'attache sont appropriées aux organes de fixation des machines d'essais; leurs formes et dimensions peuvent être considérées comme indifférentes, sous la condition de ne pas créer de flexions dans le sens de l'axe de traction : têtes excentrées, non symétriques, etc...

Repères. — L'écartement L entre repères, pour le relevé de l'allongement, est déterminé, quel que soit le diamètre, par la formule :

$$L = \sqrt{66,67S},$$

S étant la section.

Ces repères sont croisés à partir de la naissance des congés, et la fraction entre ces repères qui servira à calculer l'allongement pour 100 sera celle qui comprendra la section de rupture.

Dimensions des éprouvettes. — La partie calibrée des éprouvettes sera tournée à 2 millimètres au-dessous du diamètre primitif des barres; on pourra déroger à cette condition, lorsque son application ne sera pas possible avec la machine employée dans l'usine.

Durée de l'essai. — *Température.* — L'essai a lieu, par traction progressive, à la température ambiante. Sa durée proportionnelle au volume de l'éprouvette sera comprise entre une et six minutes.

Résultats. — Les résultats à obtenir sont indiqués au tableau ci-après :

	ESSAIS DE TRACTION A FROID	
	RÉSISTANCE MINIMA par millimètre carré de la section pleine primitive S	ALLONGEMENT MINIMUM POUR 100 mesuré sur une longueur entre repères $L = \sqrt{66,67S}$
Barres pour entretoises et rivets............	23 kilogrammes	30 kilogrammes

Essai de pliage sur bouts filetés. — *Prélèvement et préparation.* — Un bout de barre pour entretoises, non recuit après étirage et d'environ 200 millimètres de longueur, sera fileté sur le tour, au pas de 2 millimètres avec l'angle de 60° et la profondeur du filet de $1^{mm},3$.

Ce filetage sera fait en deux passes seulement : la première en chario-

tant et la seconde en produisant le filet d'un même coup au profil définitif.

Mode d'essai. — Le bout fileté sera plié à froid, en son milieu au marteau, sur l'enclume, jusqu'au parallélisme des deux branches avec un écartement entre elles égal au diamètre de la barre (*fig.* 155).

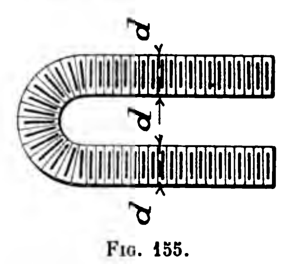


Fig. 155.

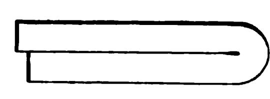
Résultats. — Les filets devront être parfaitement lisses, sans aucune espèce d'arrachement ou d'égrènement et sans fissures longitudinales, stries ou autres défauts.

Après le pliage, le barreau ne devra présenter ni criques, ni fissures, ni aucun autre défaut.

Essai de pliage sur bouts non filetés. — *Prélèvements.* — Un bout de barre de 250 millimètres environ de longueur (sur les barres pour rivets).

Mode d'essai. — Ce bout sera plié en son milieu à bloc et à froid sans recuit préalable (*fig.* 156).

Résultats. — L'éprouvette, après essai, ne devra présenter aucune crique, ni rupture, ni défaut quelconque.


Fig. 156.

Essai de poinçonnage. — *Prélèvements* (*sur chaque barre pour entretoises*). — Bout de 5 centimètres de longueur, tombé à l'essai de texture.

Mode d'essai. — Chaque bout sera percé suivant son axe d'un trou de 8 millimètres de diamètre et de 30 millimètres de profondeur. On enfoncera ensuite dans ce trou, à coups de marteau, un poinçon conique à angle de 24°, de façon à ouvrir progressivement le métal et jusqu'à ce que le diamètre d'entrée atteigne 16 millimètres.

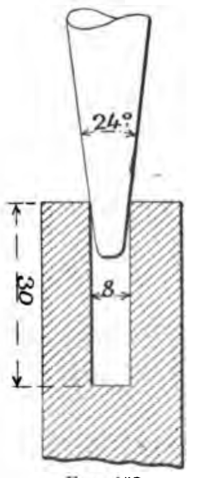


Fig. 157.

Résultats. — Les éprouvettes ne devront présenter aucune fente, ni déchirure, ni trace d'oxyde.

L'essai pourra être poussé jusqu'à la rupture et le métal devra se déchirer en un seul endroit, présentant une cassure soyeuse, exempte de tout défaut.

Toute barre qui ne satisfera pas à ces conditions sera refusée, et si le nombre de ces barres refusées dépasse 15 0/0 de la quantité des barres présentées, le lot entier pourra être refusé.

CHEMINS DE FER FRANÇAIS

PLAQUES DE FOYERS ET PLANCHES EN CUIVRE ROUGE

CHAPITRE I

CONDITIONS GÉNÉRALES

Fabrication. — Le cuivre rouge employé doit être de première qualité (équivalente à celle dite « Corocoro »), affiné avec le plus grand soin, parfaitement homogène et très malléable ; sa cassure fraîche doit être rose et soyeuse. Il doit être aussi pur que possible.

La proportion totale de matières étrangères : métaux, oxydes, soufre et arsenic, ne devra pas dépasser 4 millièmes (0,004).

Les lingots seront sains et exempts de piqûres, soufflures, reprises ou autres défauts ; ils seront débarrassés, à la machine-outil, de la croûte superficielle crispée, que présente leur surface supérieure.

Cette opération n'est pas exigée pour les lingots destinés à la fabrication des planches ayant une épaisseur plus petite que 8 millimètres. Avant laminage, les lingots seront purgés au burin de toutes pailles, soufflures ou autres défauts apparents; ils seront ensuite dégrossis au laminoir, soumis de nouveau au dépaillage avant laminage à la cote définitive et enfin éboutés aux deux extrémités de façon à supprimer les régions sujettes aux piqûres.

Aspect extérieur. — Dressage. — Les plaques de foyers et les planches seront recuites et décapées avec soin après le laminage ou le façonnage suivant le cas ; elles présenteront des surfaces parfaitement propres, lisses, exemptes entièrement de piqûres, dartres, gerçures, manques de matières ou autres défauts pouvant nuire à leur aspect ou à leur solidité.

Les plaques de foyers seront exécutées dans toutes leurs parties, conformément aux indications des dessins ; elles seront parfaitement dressées dans les parties planes ; les bords seront nettement affranchis ; les congés de raccordement seront bien parés et calibrés, en suivant rigoureusement les cotes des dessins. L'emploi du dégorgeoir pour façonner l'intérieur des congés raccordant les bords relevés avec les plaques de foyers

n'est autorisé que si le rayon de la panne de cet outil est au minimum égal à celui du congé.

Écrouissage. — Les plaques tubulaires de boîtes à feu et les plaques tubulaires de boîtes à fumée seront écrouies, si la commande le prescrit, soit au marteau, soit à la chasse, sur les deux faces dans la partie recevant les tubes, de telle sorte que leur épaisseur soit réduite de 1 millimètre à 1^{mm},5 par l'écrouissage et corresponde bien à la commande après cette opération.

Tolérances sur les dimensions de surface. — La tolérance est limitée à 8 millimètres en plus, rien en moins pour les cotes brutes de longueur, de largeur, ainsi que de hauteur des bords relevés.

Pour les plaques de foyers embouties, la forme de la plaque, délimitée par les bords relevés, devra être exactement conforme aux indications du dessin sans aucune tolérance.

Tolérances sur les épaisseurs. — Les épaisseurs seront aussi uniformes et régulières que possible, les tolérances admises étant, au maximum, celles indiquées ci-après :

ÉPAISSEURS EN MILLIMÈTRES	TOLÉRANCES EN PLUS — LARGEURS			TOLÉRANCES EN MOINS — LARGEURS		
	inférieures à 1^{m},500	de 1^{m},500 à 1^{m},999	de 2^{m},000 et au dessus	inférieures à 1^{m},500	de 1^{m},500 à 1^{m},999	de 2^{m},000 et au dessus
Au-dessous de 2^{mm}..	0^{mm},2	0^{mm},3	»	0^{mm},1	0^{mm},1	»
de 2^{mm} à 3^{mm},9....	0 ,3	0 ,4	»	0 ,2	0 ,2	»
4 à 5 ,9....	0 ,4	0 ,5	»	0 ,2	0 ,2	»
6 à 7 ,9....	0 ,4	0 ,6	0^{mm},7	0 ,3	0 ,3	0^{mm},3
8 à 9 ,9....	0 ,5	0 ,7	0 ,9	0 ,3	0 ,3	0 ,3
10 à 11 ,9....	0 ,5	0 ,7	0 ,9	0 ,4	0 ,4	0 ,4
12 à 13 ,9....	0 ,5	0 ,7	0 ,9	0 ,5	0 ,5	0 ,5
14 à 15 ,9....	0 ,5	0 ,7	1 ,9	0 ,5	0 ,5	0 ,5
16 à 17 ,9....	0 ,5	0 ,7	1 ,0	0 ,5	0 ,5	0 ,5
18 à 19 ,9....	0 ,6	0 ,8	1 ,1	0 ,5	0 ,5	0 ,5
20 à 21 ,9....	0 ,7	0 ,9	1 ,2	0 ,5	0 ,5	0 ,5
22 à 23 ,9....	0 ,8	1 ,0	1 ,3	0 ,5	0 ,5	0 ,5
24 à 25 ,9....	0 ,9	1 ,1	1 ,4	0 ,5	0 ,5	0 ,5
26 et au dessus...	1 ,0	1 ,2	1 ,5	0 ,5	0 ,5	0 ,5

Toute variation d'épaisseur dépassant ces limites pourra donner lieu au rebut.

CHAPITRE II

NATURE ET PROPORTION DES ESSAIS

État des pièces à la présentation en recette. — Les plaques de foyers seront présentées avec un excédent de matière, destiné aux essais, d'environ 800 millimètres de longueur sur 50 millimètres de largeur.

Les planches seront présentées avec des excédents de surface offrant des parties saines suffisantes pour permettre tous les prélèvements d'essais.

Nature des essais. — Les essais auxquels seront soumises les plaques de foyers et les planches sont les suivants :

Essai de traction. — Sur métal à l'état de livraison ou avant écrouissage.

Essai de pliage à froid. — Sur métal à l'état de livraison ou avant écrouissage.

Il pourra, en outre, être fait un essai chimique pour déterminer la proportion des matières étrangères.

Proportion des essais. — *Essai de traction.* — Pour les plaques de foyers et planches d'épaisseur égale ou supérieure à 5 millimètres : 1 essai par plaque de foyer ; 1 essai par lot de planches de 500 kilogrammes.

Essai de pliage à froid : 1 essai par plaque de foyer ; 1 essai par lot de planches de 500 kilogrammes.

Analyse chimique : 1 essai par lot de 10 plaques de foyer ou planches.

Toute fraction de lot peut donner lieu à une série complète d'essais.

CHAPITRE III

PRÉLÈVEMENTS ET PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES

Traçage des prélèvements. — Les prélèvements sont, pour le traçage, le poinçonnage et le repérage, faits sur les indications et par les soins de l'agent réceptionnaire.

Découpage des prises d'essais. — Dressage. — Cette opération doit avoir lieu entièrement à froid, à la machine-outil, par mortaisage et de préférence par sciage, etc. Les bandes peuvent être aussi détachées à la tranche, au

poinçon ou à la cisaille, en évitant autant que possible, dans ce dernier cas, les déformations dans les découpages successifs.

Les prélèvements déformés seront redressés à froid.

Finissage. — Le travail de préparation des barreaux ajustés doit avoir lieu ensuite entièrement à froid, au moyen de machines-outils, sans aucune opération ultérieure de martelage, trempe, ni recuit. Les faces de laminage seront conservées. Les champs seuls seront travaillés.

Les arêtes des barreaux pour essais de pliage seront légèrement adoucies à la lime, sans congé appréciable.

Pour les éprouvettes destinées aux essais de traction, on laissera toujours au moins un demi-millimètre, de manière à enlever à la lime sur les champs, dont les surfaces seront polies à la lime douce.

Poinçons de la Compagnie. — Les barreaux d'essais conserveront à chaque tête les poinçons de la Compagnie.

CHAPITRE IV

MODES D'ESSAIS. — RÉSULTATS A OBTENIR

Condition générale. — Les résultats à obtenir, indiqués ci-après dans chaque essai, sont des minima absolus.

Toute épreuve qui ne remplira pas complètement les conditions fixées pourra donner lieu au rebut du lot correspondant.

Essai de traction. — *Forme des éprouvettes.* — Les têtes d'attaches sont appropriées aux organes de fixation des machines d'essais; leurs formes et dimensions peuvent être considérées comme indifférentes, sous la condition de ne pas créer de flexions dans le sens de l'axe de traction : têtes exécutées non symétriques, etc.

Pour faciliter le travail de mortaisage, de fraisage ou de rabotage en paquet, par série d'épaisseur, toutes les éprouvettes ont une longueur uniforme de 200 millimètres à la partie calibrée.

Repères. — L'écartement L entre repères pour le relevé de l'allongement est déterminé par la formule $L = \sqrt{66,67S}$, S étant la section.

Ces repères sont croisés à partir de la naissance des congés. La fraction entre ces repères qui servira à calculer l'allongement pour 100 sera celle qui comprendra la section de rupture.

Les dimensions des éprouvettes de 5 à 30 millimètres d'épaisseur sont données dans le tableau ci-après :

TABLEAU DES DIMENSIONS DES ÉPROUVETTES POUR LES ÉPAISSEURS DE 5 MILLIMÈTRES A 30 MILLIMÈTRES

ÉPAISSEUR EN MILLIMÈTRES	SECTION en MILLIMÈTRES CARRÉS	ÉCARTEMENT ENTRE REPÈRES en millimètres	LONGUEUR DE LA PARTIE CALIBRÉE en millimètres	ÉPAISSEUR EN MILLIMÈTRES	SECTION en MILLIMÈTRES CARRÉS	ÉCARTEMENT ENTRE REPÈRES en millimètres	LONGUEUR DE LA PARTIE CALIBRÉE en millimètres	ÉPAISSEUR EN MILLIMÈTRES	SECTION en MILLIMÈTRES CARRÉS	ÉCARTEMENT ENTRE REPÈRES en millimètres	LONGUEUR DE LA PARTIE CALIBRÉE en millimètres
Largeur uniforme de 30 millimètres				*Largeur uniforme de 25 millimètres*				*Largeur uniforme de 20 millimètres*			
5	150	100		11	275	135		21	420	170	
6	180	110		12	300	140		22	440		
7	210	120		13	325	150		23	460	175	
8	240	125	200	14	350	155		24	480	180	
9	270	135		15	375	160	200	25	500	185	200
10	300	140		16	400	165		26	520		
				17	425	170		27	540	190	
				18	450	175		28	560	195	
				19	475	180		29	580		
				20	500	185		30	600	200	

Le rayon de raccordement de la partie calibrée aux têtes aura uniformément 10 millimètres.

Durée de l'essai. — Température. — L'essai a lieu par traction progressive à la température ambiante; sa durée, selon le volume de l'éprouvette, sera comprise entre une et six minutes.

Résultats. — Les résultats à obtenir sont indiqués au tableau ci-après :

	ESSAI DE TRACTION A FROID	
	RÉSISTANCE MINIMUM par millimètre carré de section primitive S	ALLONGEMENT MINIMUM 0/0 mesuré sur une longueur entre repères $L = \sqrt{66,67S}$
Plaques de foyers et planches d'épaisseur ⩾ 5 millimètres.	20 kilogrammes	35

Essai de pliage à froid. — *Prélèvements.* — Une bande de 250 millimètres environ de longueur et 40 millimètres de largeur.

Fig. 158.

Mode d'essai. — La bande sera pliée à froid, à bloc suivant la figure 158, soit au marteau à main, à l'étau ou sur l'enclume, soit au marteau-pilon.

Résultats. — La bande doit supporter ce double pliage sans présenter, sur l'une ou sur l'autre surface, aucune crique, gerçure, déchirure ou défaut quelconque.

CHEMINS DE FER FRANÇAIS

TUYAUX EN CUIVRE ROUGE SANS SOUDURE

CHAPITRE I

CONDITIONS GÉNÉRALES

Classification. — Les tuyaux de toutes dimensions en cuivre rouge sans soudures sont de deux qualités : A et B.

Fabrication. — Le cuivre rouge employé doit être de première qualité; il doit être aussi pur que possible.

La proportion totale des matières étrangères (métaux, oxydes, soufre et arsenic) ne devra pas dépasser 0,4 0/0.

Les tuyaux ne seront pas recuits après la dernière passe d'étirage.

Aspect, dressage. — Les tuyaux seront parfaitement cylindriques et devront avoir une épaisseur uniforme sur toute la longueur et sur tout le pourtour; ils seront bien droits et leurs extrémités seront coupées nettement et d'équerre. Les surfaces intérieure et extérieure doivent être bien décapées, lisses et exemptes de rayures, crevasses, pailles, gerçures ou autres défauts pouvant nuire à l'apparence ou à la solidité.

Tolérances. — Les tolérances ci-après sont comptées, sur les longueurs, diamètres et épaisseurs de commande.

1° *Sur les longueurs.* — Aucune tolérance en moins n'est admise sur les cotes de longueur fixées; la tolérance en plus est limitée à 5 millimètres.

2° *Sur les diamètres.* — Les tolérances admises sont limitées à $0^{mm},5$ en plus ou en moins. Si le tube est ovalisé, la tolérance sera appliquée à la moyenne entre le plus grand et le plus petit diamètre ; mais l'ovalisation (différence entre les deux diamètres) ne devra pas dépasser 2 0/0 du diamètre extérieur résultant de la commande.

3° *Sur les épaisseurs.* — 2/10 en plus avec maximum de $0^{mm},6$ sans aucune tolérance en moins.

CHAPITRE II

NATURE ET PROPORTION DES ESSAIS

Les essais auxquels seront soumis les tuyaux sont les suivants :

NATURE DES ESSAIS	PROPORTIONS DES ESSAIS	QUALITÉS
Essai de pression..............	1 essai par tuyau	A et B
Essai d'éclatement.............	1 — 100 —	A
Essai de rabattement de collerette.....................	1 — 25 —	A et B
Essai d'aplatissement..........	1 — 100 —	A
Essai de cintrage..............	1 — 25 —	A et B

Il pourra, en outre, être fait des essais chimiques pour déterminer la proportion de matières étrangères.

Toute fraction de lot peut, au gré de la Compagnie, donner lieu à une série complète d'essais.

Quelle que soit la longueur de commande, un tuyau sera compté pour une unité dans le lot, s'il est présenté à l'agent réceptionnaire avant sa mise à longueur.

CHAPITRE III

PRÉLÈVEMENTS ET PRÉPARATION DES MORCEAUX D'ESSAIS

Traçage des prélèvements. — Les prélèvements sont tracés, poinçonnés et repérés sur les indications et par les soins de l'agent réceptionnaire.

Découpage des prises d'essais. — Cette opération doit avoir lieu entièrement à froid.

Poinçons de la Compagnie. — Les morceaux d'essais conserveront les poinçons de la Compagnie.

CHAPITRE IV

MODES D'ESSAIS. — RÉSULTATS A OBTENIR

Condition générale. — Les résultats à obtenir, indiqués ci-après, dans chaque essai, sont des minima absolus.

Toute épreuve qui ne remplira pas complètement les conditions fixées pourra donner lieu au rebût du lot correspondant.

Essai de pression. — *Prélèvements* (qualités A et B). — Chaque tuyau.

Mode d'essai. — Le tuyau sera soumis, au moins pendant une minute, à une pression hydraulique intérieure P, en kilogrammes par centimètre carré, déterminée par la formule $P = 800 \frac{e}{d}$ (e, épaisseur, et d, diamètre intérieur du tuyau, exprimé en millimètres) avec maximum de 25 kilogrammes.

Résultats. — Il ne devra se produire ni suintement ni trace quelconque d'altération.

Essai d'éclatement. — *Prélèvements* (qualité A seulement). — Un bout de tuyau d'au moins 1 mètre de longueur.

Mode d'essai. — Ce bout de tuyau recuit au rouge très sombre (450 à 500°), puis refroidi lentement à l'air, sera soumis à une pression hydraulique intérieure jusqu'à éclatement.

Quelle que soit la dimension des tubes essayés, la pression ne devra pas être poussée au-delà de 500 kilogrammes par centimètre carré.

$l = \frac{d}{2}$ ou ≤ 25 m/m

Fig. 159.

Résultats. — La charge R par millimètre carré de section primitive du tuyau correspondant à la pression d'éclatement et calculée par la formule $R = \frac{Pd}{2e}$ sera d'au moins 15 kilogrammes (P, pression en kilogrammes par millimètre carré; d, diamètre intérieur; e, épaisseur du tuyau exprimée en millimètres).

La déformation permanente du tuyau ne devra pas se manifester avant que la pression intérieure ait atteint le 1/5 de la pression d'éclatement.

La section de rupture ne devra révéler ni paille, ni gerçure, et sera saine.

Essai de rabattement de collerette. — *Prélèvements* (qualités A et B). Un bout de tuyau de longueur suffisante.

Mode d'essai. — Cet essai sera fait sur le métal non recuit.

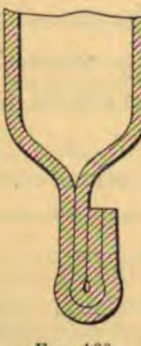
Une collerette plane dont la largeur l sera égale à la moitié du d mètre intérieur d du tuyau, mais limitée à 25 millimètres pour tous tuyaux dont le diamètre intérieur dépassera 50 millimètres, sera rabatt à froid à angle droit (*fig.* 161.)

Le congé de raccordement aura un rayon r égal à l'épaisseur e du tuy

Résultats. — Le rabattement devra pouvoir être fait sans qu'il se ma feste aucune crique, gerçure ou déchirure.

Essai d'aplatissement à chaud et à froid. — *Prélèvement* (qualité A se lement). — Deux bouts de tuyaux de longueur suffisante.

Mode d'essai. — Ces deux bouts de tuyaux seront soumis, l'un à fro



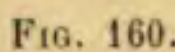


Fig. 160.

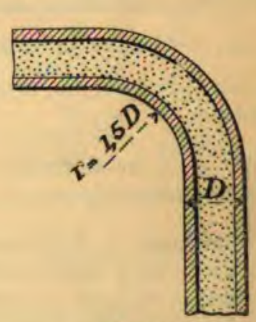


Fig. 161.

mais après recuit, et l'autre au rouge cerise naissant, à deux aplati ments successifs à bloc (*fig.* 160). L'aplatissement à chaud, qui devra fait en une seule chaude, permettra d'apprécier comment le métal s porte l'action du feu.

Résultats. — Il ne devra se manifester aucune crique, gerçure déchirure.

Essai de cintrage. — *Prélèvements.* — Qualité A : sur les tuyaux de t diamètres.

Qualité B : seulement sur les tuyaux de diamètre < 60 millimètres.

Un bout de tuyau de longueur suffisante.

Mode d'essai. — Ce bout de tuyau, préalablement rempli de résine, s cintré régulièrement à froid sur un quart de circonférence jusqu'à ce le rayon r de la courbure intérieure soit égal à une fois et demie le mètre extérieur D du tuyau.

Résultats. — L'opération ne devra pas exiger plus de deux reprises il ne devra se manifester aucune crique ni fissure.

TYPES DE CAHIERS DES CHARGES POUR BRONZES

CHEMINS DE FER DE L'ÉTAT ET P.-L.-M.

DÉSIGNATION DE L'ALLIAGE	NUMÉRO du TITRE	QUANTITÉS DE MÉTAUX DIVERS POUR 100 D'ALLIAGE					
		CUIVRE ROUGE	ÉTAIN	ZINC	PLOMB	ANTIMOINE	NICKEL
Pièces à frottement circulaire : Coussinets de boîtes à graisse, de bielles motrices, d'accouplement, colliers d'excentriques...	1	82	16	2	»	»	»
Pièces à frottement alternatif : Tiroirs, bagues de presse-étoupes, soupape de sûreté et leurs sièges, pièces filetées, vis ou écrous, etc....	2	84	14	2	»	»	»
Pièces non sujettes à un frottement continu : Robinets, sifflets, godets graisseurs, pièces des injecteurs, écrous divers, etc.........	3	90	8	2	»	»	»
Bronze rouge pour pièces destinées à être brasées sur les tuyaux, etc...	4	95	3	2	»	»	»

CHEMINS DE FER DU NORD

NUMÉROS	COMPOSITION DES ALLIAGES				APPLICATIONS
	CUIVRE	ÉTAIN	ZINC		
1	82	18			Coussinets de wagons non régulés.
2	85	13	2		Bagues de tête de piston; coussinets pour locomotives, tenders, locomobiles, grues, machines-outils, etc. Colliers d'excentriques et garnitures de colliers d'excentriques, soupapes et clapets, toutes pièces concernant les sifflets; presse-étoupes, presse-garnitures, toutes pièces frottantes taraudées; boîtes à étoupes rapportées; supports de sifflets et de balances; godets graisseurs et couvercles; bagues de colonnes de freins de changements de marche à vis; guides d'avant de tiges de tiroirs et de régulateurs; sièges de boulets, boîtes à boulets, toutes pièces concernant les rotules; entretoises de coulisse de distribution, toutes pièces concernant les injecteurs, excepté les corps, les prises de vapeur; les valves à vapeur, les éjecteurs sauf les cheminées et les culottes; fourreaux de presse-garnitures; bagues de presse-étoupes, de presse-garnitures, de boîtes à étoupes; jets creux et pleins; poulies; cales de glissières de boîtes à graisse.
3	90	8	2		Volants pour échappement, prises de vapeur, etc., dont le moyeu est fileté; niveaux d'eaux; cuvettes de soupape de sûreté; bouchons de toutes sortes; tampons de lavage; écrous borgnes; pommes de rampe; écrous de vérins, boisseaux et clés de robinets, supports de mains courantes, jets creux et pleins; chaufferettes, écrous de chariots de tours; chapelles d'entrée d'eau; engrenages, écrous et rondelles, cheminées et culottes d'éjecteur et d'échappement, valves à air; corps d'éjecteurs, carcasses de coussinets de voitures et wagons.
	CUIVRE	ÉTAIN	ZINC	CUIVRE phosphoreux	
4	78	11	7,5	3,5	Tiroirs de distribution et de régulateur, bagues pour réparations des pièces articulées, de mécanisme; bagues coussinets de bielles d'accouplement; bagues, coussinets de petites têtes de bielles motrices, écrous de vis de changement de marche; carcasses des coussinets de wagons en bronze et métal blanc.

La proportion de matières étrangères ne devra jamais dépasser les 0,02 du poids total. La proportion de cuivre ne devra pas varier de plus de 0,01 en plus ou en moins de la proportion indiquée.

CHEMINS DE FER DU MIDI

Les pièces brutes en bronze seront moulées avec tous les soins apportés dans les meilleurs ateliers aux travaux de ce genre.

Elles seront exemptes de soufflures, dartres, gouttes froides, reprises et, en général, de tous défauts quelconques pouvant nuire à leur solidité ou à leur durée.

Elles seront soigneusement ébarbées et nettoyées après leur coulée.

Chaque pièce portera, venue de fonte, la marque du fournisseur.

Les pièces en bronze seront divisées, d'après l'usage auquel elles sont destinées, en trois catégories, et la composition de l'alliage dont elles seront formées sera, pour chacune d'elles, celle indiquée au tableau ci-dessous.

MÉTAUX ENTRANT DANS LA COMPOSITION DES ALLIAGES	PREMIÈRE CATÉGORIE	DEUXIÈME CATÉGORIE	TROISIÈME CATÉGORIE
Cuivre rouge	84	83	86
Étain	14	12	9
Tolérance pour métaux divers et impuretés	2	5	5

Il est accordé, d'autre part, pour les compositions des divers alliages précités, les tolérances suivantes en ce qui concerne le cuivre, l'étain et le zinc.

Sur le cuivre : 1 0/0 en plus ou en moins du poids de l'alliage, correspondant pour l'étain à 1 0/0 en moins ou en plus du poids de l'alliage.

ARTILLERIE

MATÉRIEL DE L'ARTILLERIE ET DES ÉQUIPAGES MILITAIRES

Composition de l'alliage. — A moins d'indications contraires des tables de construction ou des cahiers des charges spéciaux, le bronze doit être de la qualité dite bronze mécanique au titre de :

Cuivre	90	± 1
Etain	6	± { 1 / 0
Zinc	4	± { 0 / 1
	100	

Il est toléré 1 0/0 de matières étrangères, dont 1 0/0 de plomb au maximum.

Dans la fabrication de certaines pièces, on emploie le bronze phosphoreux, dont la composition ne diffère de celle du bronze mécanique qu'en ce qu'il doit contenir 0,1 0/0 de phosphore. Les tolérances sur la quantité de phosphore contenu sont 0,05 0/0 en plus et 0,02 0/0 en moins.

MATÉRIEL DE CHEMINS DE FER (MODÈLE 1888)

Le bronze suivant, indiqué à la nomenclature des pièces, est au titre de

82 de cuivre pour 18 d'étain

ou de :

84 — 16 —

ou de :

90 — 10 —

Les tolérances sur la composition sont pour :

Le cuivre......................	± 1 0/0
L'étain	± 1 0/0

Les matières étrangères ne doivent pas dépasser les quantités suivantes

Silicium	0,3	Ensemble 1,5 au maximum.
Zinc	0,5	
Fer	0,2	
Arsenic et antimoine réunis	0,1	
Phosphore	0,1	
Soufre	0,1	
Plomb	0,4	
Impuretés diverses	0,1	

Pour robinetterie, on emploie le bronze au titre de 90 de cuivre et de 10 d'étain. La tolérance en matières étrangères composées en moyenne partie de plomb et de zinc est de 2 0/0 au maximum. Un échantillon par coulée est adressé à la Direction des Forges pour être analysé par le laboratoire de la Section technique de l'Artillerie.

ÉCOLE CENTRALE DE PYROTECHNIE MILITAIRE

Le bronze en barres rondes de 9 millimètres de diamètre aura la composition suivante :

Cuivre	90	avec la tolérance d'usage.
Étain	10	

Les barres devront être bien droites et exemptes de criques, fentes ou pailles. Le métal, parfaitement homogène, devra pouvoir se travailler au tour à décolleter marchant à grande vitesse.

La longueur des barres sera comprise entre 1^{m},50 et 1^{m},80.

Le bronze en barres d'autres dimensions que ci-dessus aura la même composition. Les barres devront être bien droites et exemptes de fentes, pailles, criques ou autres défauts préjudiciables.

La longueur des barres sera comprise entre 1^{m},40 et 3 mètres.

ADMINISTRATION DE LA MARINE

BRONZES	CUIVRE	ÉTAIN	ZINC	ANTIMOINE	PLOMB
Coussinets de grandes bielles sans antifriction, grains pour crapaudines	84	16	(a)	»	»
Coulisseaux, coussinets de lignes d'arbres et autres sans antifriction, plaques de frottement, touches pour tiroirs et pour manivelles, tiroirs, glissières	86	14	(a)	»	»
Boîtes à étoupes, cadres pour compensateurs, colliers et chariots d'excentriques, cylindres de pompes à air, coussinets portant antifriction, douille de presse-étoupes, engrenages, fourreaux pour pistons et pistons plongeurs de pompes alimentaires, presse-étoupes, robinets-clapets et sièges de clapets métalliques, soupapes, valves, cylindres et pistons de détente	88	12	(a)	»	»
Hélices, boîtes pour tuyautage, boulons, chapeaux de paliers, paliers, couvercles de pompes à air, sièges pour clapets en caoutchouc et butoirs, corps de pompes alimentaires et de cale sans frottement métallique, écrous, volants, garnitures de niveau d'eau, boîtes d'alimentation, tiges de piston	90	10	(a)	»	»
Brides pour tuyautages, crépines, collerettes, récipients, calottes et tubulures pour tuyautage, tuyaux, etc	94				

(a) Conformément aux prescriptions de la circulaire du 28 janvier 1892, l'analyse chimique pourra signaler la présence du zinc en faible proportion (2 0/0 au plus); les proportions de cuivre et d'étain seront rapportées à 100 parties de ces deux métaux.

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE VII

ÉTUDE THÉORIQUE

Behrens, *Das Mikroskopische Gefüge der Metalle und Legierungen*, 1894 (*Micrographie*).

Campbell, *Engineering*, janvier 1902, p. 28 (*Id.*).

Charpy, *Bulletin de la Société d'Encouragement*, mars 1897; — *Contribution à l'étude des Alliages*, p. 149 (*Id.*).

Guillemin, *Commission des Méthodes d'essais*, 1894 (*Id.*).

Herschkowitsch, *Zeitschrift für physikalische Chemie*, t. XXVII, p. 123, 1898 (*Force électromotrice de dissolution et chaleur de formation*).

Heycock et Neville, *Philosoph. Transactions of the Royal Society*, janvier 1904 (*Diagramme et micrographie*).

Laurie, *Philosophical Magazine*, V, p. 33, 1894 ; — et *Journ. Chemical Society*, CCCII, 104 ; CCCXXV, 477; LXVI, p. 1031 (*Force électromotrice de dissolution*).

Le Chatelier (H.), *Bulletin de la Société d'Encouragement*, 1895, p. 573 (*Courbe de fusibilité*).

ÉTUDE INDUSTRIELLE. — OUVRAGES GÉNÉRAUX

Guettier, *la Fonderie en France*, Bernard, éditeur, 1882 (*Généralités*); — *Guide pratique des Alliages*.

Hiorns, *les Alliages métalliques* (Traduction Boudouard), Steinheil, éditeur, p. 162 à 243 (*Id.*).

Knab, *Traité des Alliages métalliques*, Steinheil, éditeur, p. 31 à 224 (*Id.*).

Krupp, *Die Legierungen*, Vienne, 1894, p. 144 (*Id.*).

Ledebur, *les Alliages métalliques, leurs emplois dans l'industrie*, Fritsch, 1894 (*Id.*).

Percy, *Traité de Métallurgie*, Bernard, éditeur, 1864 (*Id.*).

Ponthière, *les Alliages de Cuivre*, Louvain, 1889 (*Id.*).

Thurston, *Alloys Brasses and Bronzes*, John Willey and Sons, éditeurs, New-York, 1903 (*Id.*).

Weiller, *Nouveaux alliages industriels des métaux autres que le fer*, Saint-Etienne, 1889 (*Id.*).

Weiss, *le Cuivre*, Baillière, 1874.

MÉMOIRES PARTICULIERS

Bolley, *Essais et Recherches chimiques*, Paris, 1869 (*Propriétés*).

Calvert et Johnson, *Philosoph. Magaz.*, 1859, vol. XVII, p. 114 (*Id.*); — *Conductibilité de la chaleur* (*Philos. Trans.*, CLVIII, p. 349) (*Id.*).

Commission des Alliages métalliques des États-Unis, *Rapport spécial* (*Id.*).

Chesneau, *Classification des Haches en Bronze de la Charente* (*Id.*).
Croockewitt, *Erd'manns Journal*, 1848, vol. XIV, p. 87 (*Id.*)
Deam, *Notes d'Artillerie*, n° XL, Washington, 1875 (*Id.*).
De Champeaux, *Grande Encyclopédie*, article *Ciselure*, Paris, 1890 (*Fabrication*); — article *Cloches* (*Id.*) (*Bronze des cloches*).
Guillet, *Revue de Métallurgie*, février 1905 (*Trempe*); — *Génie civil*, t. XLVII, n° 8, p. 126, 1905 (*Propriétés*).
Girard, *Grande Encyclopédie*, article *Bronze*, Paris, 1890 (*Fabrication*).
Hallopeau, *l'État de la Métallurgie*, Paris, 1889 (*Id.*).
Lami, *Dictionnaire de l'Industrie et des Arts industriels*, article *Ciselure* (*Bronze d'art*) et articles *Bouches à feu* (*Bronze à canons*).
Lewis, *Engineering* (*Utilisation*).
Lafond, *Dingler's Journal*, 1855, vol. CXXXV, 269 (*Propriétés*).
Mallet, *Philos. Mag.*, 1842, vol. XXI, p. 66 (*Id.*).
Matthiessen, *Phil. Trans.*, 1860, p. 161 (*Id.*); — 1863, p. 167 (*Id.*).
Marchand et Scheerer, *Journal für praktische Chemie*, vol. XXVII, p. 193 (*Id.*).
Musschenbrock, *Ure's Dictionary*, article *Alloy* (*Id.*).
Périssé, *le Bronze*, Paris, 1885 (*Généralités*).
Riche, *Annales de Chimie et de Physique*, 1873, vol. XX, p. 351 (*Propriétés*).
Roberts-Austen, *les Alliages : Trois leçons* (Traduction Gustave Richard), Paris, 1890 (*Généralités*).
Servant, *les Bronzes d'Art*, Paris, 1880 (*Fabrication*).
Susane, *Histoire de l'Artillerie*, Paris, 1870 (*Bronze à canons*).
Thomson, *Annales de Chimie*, 1814, p. 46 (*Propriétés*).
Wade, *Rapport sur les Expériences faites aux États-Unis pour les canons*, 1856 (*Id.*).
Wiedmann, *Phil. Magaz.*, 1860, vol. XIX, p. 243 (*Id.*).

CHAPITRE VIII

ALLIAGES DE CUIVRE. — LES BRONZES SPÉCIAUX

On appelle *bronze spécial* un alliage qui contient, outre le cuivre et l'étain, un autre corps ajouté *intentionnellement.* Toutefois, les bronzes contenant du zinc sont généralement regardés comme bronzes ordinaires.

Il nous faudra cependant étudier l'influence de ce métal.

Les principaux bronzes spéciaux sont :

Les bronzes au plomb;

Les bronzes au phosphore;

Les bronzes au manganèse;

Les bronzes au silicium;

Les bronzes à l'aluminium;

Les bronzes au vanadium.

Nous dirons de plus quelques mots des bronzes au chrome, au tungstène et au fer.

BRONZES AU ZINC

Étude théorique (Album, Pl. XLVIII, Phot. 189 et 190). — Nous avons vu que le zinc est souvent ajouté aux alliages cuivre-étain et qu'il entre même dans la composition de la plupart des bronzes ordinaires.

En faible quantité, le zinc permet de mieux allier les deux métaux cuivre et étain, d'obtenir des coulées présentant moins de soufflures et des moulages plus parfaits. Il est fort

probable qu'il joue le rôle de désoxydant par formation d'oxyde de zinc; de plus, il abaisse le point de fusion.

D'après les recherches qui ont été faites sur les propriétés mécaniques, on peut dire que la résistance et la limite élastique sont très nettement élevées par une addition de zinc ne dépassant pas 2 0/0. Au delà, il y a une diminution très nette dans la ténacité et la dureté. — Voici, d'ailleurs, les résultats des essais que nous avons faits sur des bronzes, du type

Cu	90
Sn	10

dans lesquels nous avons substitué du zinc à l'étain.

COMPOSITION			PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES					
Cu	Sn	Zn par différence	R	E	A 0/0	Σ	CHOC	DURETÉ
90,34	9,62	0,04	27,4	11,6	24,5	36,3	6	58
90,45	8,93	0,62	28,4	12,5	23,5	26,6	6	53
90,24	6,90	2,86	22,7	10,0	27,5	36,4	6	54
91,36	4,52	4,12	16,4	6,5	16,5	17,8	6	49
90,47	2,90	6,63	18,0	6,0	23	24,3	4	49
90,35	0	9,65	10,0	5,2	13	21,0	12	39

De ces résultats il découle que le zinc commence bien par augmenter la charge de rupture.

Mais un certain pourcentage la diminue lentement, ainsi que la limite élastique, tandis que les allongements, les strictions, la fragilité restent constants (du moins jusqu'à l'alliage ne renfermant plus d'étain) et que la dureté varie peu.

Au point de vue de la constitution, le zinc passe dans la solution α.

Nous avons étudié dans le chapitre précédent les bronzes au zinc au point de vue industriel.

Rappelons cependant que l'alliage

Cu	95
Sn	4
Zn	1

est utilisé en France pour la monnaie de billon.

Après le chapitre des *Antifrictions*, nous discuterons la valeur des différents métaux employés pour le frottement.

Quant aux alliages cuivre, étain, zinc, à forte teneur en zinc et faible dose d'étain, ils doivent être envisagés comme laitons spéciaux et seront étudiés au chapitre x qui leur est consacré.

BRONZES AU PLOMB

Étude théorique (Album, Pl. XLVIII à XLIX, Phot. 188 et 191). — Les bronzes au plomb, qui sont très employés depuis quelques années comme bronzes à coussinets, ont été étudiés, au point de vue théorique, par M. Charpy, dans une étude sur les alliages antifrictions. — L'introduction du plomb dans le bronze a pour effet d'en augmenter la plasticité.

Le plomb ne s'allie pas avec le bronze. Si l'on polit un bronze au plomb, on y trouve après simple polissage des parties noires à contours arrondis qui sont formés par le plomb. Il doit entrer très peu de ce métal en solution.

M. Charpy ajoute que, si l'on examine le métal sous un éclairage oblique on voit bien que ces taches noires comprennent également de petites soufflures, dont les parois sont très brillantes et semblent bordées de petits cristaux de plomb.

D'ailleurs, ce phénomène s'explique très aisément par la vaporisation partielle du plomb au milieu de l'alliage ; il ne se produit que lorsqu'on coule l'alliage à trop haute température.

Étude industrielle. — La fabrication des bronzes au plomb ne présente en elle-même aucune difficulté. On fond le cuivre, les déchets, l'étain, et enfin on ajoute le plomb.

La seule précaution à prendre est de couler le bronze au plomb lorsqu'il est à l'état pâteux.

Mais il se produit, au moment du refroidissement, un phénomène de liquation particulièrement accentué.

Ceci s'explique d'ailleurs très bien par ce fait que le plomb, ne se combinant pas, ne commence à se solidifier que vers 325° et, en raison de sa forte densité, tend à descendre dans la masse pâteuse.

Ce phénomène est tellement accentué que, si l'on coule un jet de bronze contenant au moins 8 0/0 d'étain et renfermant plus de 8 0/0 de plomb, si on le brise et l'expose, après refroidissement lent à une atmosphère sulfhydrique, on voit se dessiner très rapidement un anneau noir très prononcé, le reste du métal ne se colorant qu'en brun.

Voici, d'ailleurs, les analyses que nous avons faites d'un bronze au plomb dont la composition à la mise au creuset était :

Cu	84
Pb	8
Sn	8

et qui avait été refroidi normalement.

La prise d'échantillon faite sur les bords a donné :

Cu	82,75
Pb	9,25
Sn	8,31
TOTAL	100,31

La prise d'échantillon faite au centre a donné :

Cu	83,67
Pb	7,42
Sn	8,32
TOTAL	99,41

On voit qu'il y a une liquation extrêmement nette et que l'alliage contient beaucoup plus de plomb aux bords qu'au centre.

Nous avons cherché à définir par quelques essais l'influence du plomb.

A cet effet nous sommes partis du bronze d'engrenage (ou bronze à canons) :

Cu	90
Sn	10
Zn	traces

dans lequel nous avons substitué au cuivre du plomb en quantités de plus en plus importantes :

COMPOSITION				PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES					
Cu	Sn	Pb	Zn par différence	R	E	A 0/0	Σ	CHOC	DURETÉ
89,98	9,32	0,51	0,19	20,6	11,3	18	21,8	6	65
89,02	9,19	1,31	0,48	20,6	10,7	21	21,2	7	58
87,56	10,07	2,38	traces	22,0	10,7	20	30,0	7	54
87,00	10,28	2,68	0,04	16,9	7,8	16	9,8	6	53
86,09	8,52	4,57	0,82	14,3	8,1	12,5	9,9	3	50
84,03	9,19	6,18	0,60	15,1	8,1	12,3	9,9	3	49

De ces essais on doit conclure que :

1° Le plomb, tant que la teneur ne dépasse pas 3 0/0, n'a d'influence que sur la charge de rupture et la limite élastique qu'il diminue lentement ; il ne diminue pas sensiblement les

allongements et les strictions; il n'augmente pas la fragilité ; il diminue lentement la dureté.

2° Des teneurs de plomb supérieures à 3 0/0 amènent une rapide diminution de la charge de rupture, qui tombe aux environs de 14 kilogrammes, et de la limite élastique, qui atteint la valeur de 8 kilogrammes; simultanément les allongements et les strictions baissent ainsi que la dureté, tandis que la fragilité s'accentue beaucoup.

3° Il est à remarquer qu'à partir d'une certaine teneur en plomb (environ 7 0/0) on trouve les mêmes résultats dans les essais mécaniques; cela s'explique par la liquation qui se fait et qui rend la teneur en plomb de l'intérieur du barreau, c'est-à-dire de l'éprouvette, sensiblement constante.

Les bronzes au plomb sont utilisés comme métal à frottement. Ils offrent une plasticité beaucoup plus grande que les bronzes ordinaires. Mais le phénomène de liquation que nous venons d'indiquer est très nuisible à leur emploi. En effet, on ne saurait, dans les conditions de refroidissement ordinaire, avoir un métal homogène; or on peut, suivant les cas, usiner plus ou moins profondément les pièces moulées en ce bronze; on ne sait donc jamais exactement la teneur en plomb de la surface qui frotte.

C'est là évidemment un très gros inconvénient. Nous verrons tout à l'heure comment on peut l'éviter.

Voici les analyses des principaux types de bronzes au plomb qui sont utilisés :

(On remarquera qu'un certain nombre de ces alliages contiennent en même temps des traces de phosphore et de zinc.)

BRONZES ÉTUDIÉS PAR CHARPY

Cu	Sn	Pb	Sb	Ph	Zn
83,35	6,60	8,44	0,16	»	0,10
80,55	2,25	10,86	2,67	0,21	0,60
84,70	10,05	4,00	0,14	0,11	0,46
82,30	8,98	7,27	0,14	0,39	0,10

Nous étudions un peu plus loin l'action du phosphore.

BRONZES ÉTUDIÉS PAR DUDLEY

Cu	Sn	Pb	Ph	As
79,70	10	9,60	0,80	»
82,20	10	7,00	»	0,80
79,70	10	9,50	»	0,80
77,00	10,5	12,50	»	»
77,00	8,0	15,00	»	»

BRONZES CITÉS PAR LEDEBUR

Alliages pour coussinets d'essieux de locomotives :

Cu	73,5
Sn....................	9,5
Zn.	9,5
Pb	9,5
Fe	0,5

Alliages pour le même usage de Stephenson :

Cu	79
Sn....................	8
Zn....................	5
Pb	8

Alliages pour anneaux obturateurs de cylindres à vapeur :

Cu	84
Sn....................	3
Zn....................	8,5
Pb	4,5

BRONZES QUE NOUS AVONS ÉTUDIÉS EN DEHORS DE CEUX DÉJA CITÉS

Cu	Sn	Pb	Ph	Zn	As	Fe
83,85	8,32	7,36	0,31	0,13	0,04	traces
83,38	8,03	8,07	0,28	»	traces	traces
83,13	10,21	6,74	0,17	»	traces	traces
85,55	8,61	5,01	0,19	»	traces	0,21
85,51	13,25	1,48	»	»	0,04	»

Bien que nous nous proposions de discuter les résultats obtenus au frottement avec ces bronzes dans le dernier paragraphe de ce chapitre, nous pouvons dire d'ores et déjà que les bronzes du type :

Cu	84
Sn	8
Pb	8
Ph	traces

donnent de bons résultats comme coussinets à grande vitesse et à charge moyenne (jusqu'à 60 à 65 kilogrammes par centimètre carré).

BRONZES AU PLOMB ET AU NICKEL

Dans l'étude des bronzes au plomb, nous avons eu soin de signaler l'ennui que présente cet alliage ; nous avons montré que l'on ne pouvait être sûr de la composition du bronze à la partie frottante, celle justement qui présente le maximum d'intérêt.

On a cherché à remédier à ce grave inconvénient par l'addition de nickel, et on a atteint ainsi les meilleurs résultats, non seulement en évitant la ségrégation, mais aussi en ayant devant soi la possibilité d'augmenter d'une façon énorme la quantité de plomb contenu.

Ces bronzes ont été lancés, il y a quelques années, par

Hendrickson et Clamer en Amérique ; ils commencent à être très employés en France, où ils ont donné, aussi bien dans les chemins de fer que dans les constructions mécaniques, des résultats excellents au frottement tant que la charge ne dépasse pas 40 à 45 kilogrammes par centimètre carré. Nous verrons d'ailleurs, à propos des antifrictions, alors que nous comparerons entre eux les différents alliages susceptibles d'être utilisés pour le frottement, que ce bronze est celui qui a donné les meilleurs rendements.

Peut-être d'ailleurs n'est-il pas juste de l'appeler bronze, étant donné ses teneurs relativement faibles en cuivre et en étain.

Voici d'ailleurs sa composition la plus ordinaire :

Cu	64
Pb	30
Sn	5
Ni	1

Un tel bronze est sensiblement homogène et cette homogénéité est bien due au nickel. Voici, en effet, les résultats d'expériences que nous avons faites sur deux jets de 80 millimètres de diamètre, coulés dans les mêmes conditions, l'un avec nickel, l'autre sans nickel :

Les prises d'échantillons ont été faites les unes au centre, les autres à la périphérie du lingot, soit dans la partie haute (près de la masselotte), soit dans la partie basse.

ÉCHANTILLONS PRÉLEVÉS	BRONZE AVEC NICKEL		BRONZE SANS NICKEL	
	Cu	Pb	Cu	Pb
Au centre et en bas	65,30	28,06	65,41	29,12
Au centre et en haut	65,40	28,39	66,01	28,21
A la périphérie et en bas	65,64	28,42	64,01	31,05
A la périphérie et en haut	65,34	28,28	64,46	30,25

L'étain et le nickel sont uniformément répartis.

On voit que, s'il n'y a pas de nickel, il y a une différence notable de composition entre le haut et le bas du lingot au centre.

Le nickel paraît former un réseau métallique qui maintient le plomb en place jusqu'à sa solidification.

Parfois nous avons trouvé une légère hétérogénéité, la teneur en plomb étant plus forte à l'intérieur qu'à l'extérieur.

D'autre part, nous avons voulu étudier des alliages basés sur le même principe, mais à plus haute teneur en plomb, et voir jusqu'à quelle teneur de ce métal on pouvait aller sans avoir à craindre de liquation. Nous avons fait couler successivement les alliages suivants en jets de 20 millimètres de diamètre.

1°	Cu	59
	Pb	35
	Ni	1
	Sn	5
2°	Cu	54
	Pb	40
	Ni	1
	Sn	5

Si l'on vient à sectionner ces jets suivant leur longueur, on trouve un métal absolument hétérogène : on voit, en effet, un cône qui renferme du plomb sensiblement pur et qui a sa base au bas du lingot (dans le sens de la coulée) et occupant à peu près toute sa surface et dont le sommet est aux deux tiers environ de la hauteur. Ce phénomène est extrêmement net dans le bronze à 40 0/0 de plomb; il l'est beaucoup moins dans le bronze à 35 0/0.

On ne peut donc pas augmenter la proportion de plomb au-delà de 30 0/0 en présence de 5 0/0 d'étain[1].

1. Voir, plus loin (p. 766), *Alliages Cuivre-Plomb*.

BRONZES AU PHOSPHORE

Historique. — De Ruolz et de Fontenay en 1853, d'une part, et Parker en 1858, d'autre part, montrèrent qu'une addition de phosphore faite au bronze améliore sensiblement ses propriétés. L'idée de l'introduction du phosphore dans le bronze est bien due à de Ruolz et de Fontenay ; une note adressée au Jury de l'Exposition internationale de 1878 prouve que ces ingénieurs ont, dès l'année 1854, entrepris et dirigé des expériences pour l'introduction du phosphore dans l'alliage des bouches à feu. Ces expériences faites dans les fonderies de Douai et de Strasbourg par ordre du Ministre de la Guerre ont eu pour résultats la fonte et l'essai à outrance, dans les polygones de l'État, de plusieurs bouches à feu de divers calibres. Le 15 octobre 1871, MM. de Ruolz et de Fontenay ont adressé à l'Académie des Sciences une note prouvant de la façon la plus irréfutable leur importante découverte dont nul ne saurait contester la priorité.

Le phosphore n'agit pas par sa présence, mais bien par son rôle désoxydant. Il réduit, en effet, les oxydes de cuivre et d'étain et particulièrement l'oxydule de cuivre, qui est très nuisible. Il se forme alors, par combinaison de l'acide phosphorique qui s'unit aux oxydes métalliques, un laitier qui vient surnager et que l'on peut enlever aisément. Montefiore-Lévy et Kunzel, qui, en 1871, ont particulièrement contribué à l'extension de l'emploi du bronze phosphoreux par leur fabrication à l'usine du Val-Benoît, ont cru que le phosphore avait un autre rôle que Hiorns décrit de la façon suivante :

« Dans beaucoup d'alliages cuivre-étain, le cuivre est le seul élément cristallisé, l'étain cristallisant très difficilement. L'alliage, à cause de cette condition physique, différente pour les

deux métaux, n'est pas aussi solide que si les deux constituants étaient cristallisés. Le phosphore a la propriété de donner à l'étain une nature cristalline qui le rend apte à se combiner plus intimement au cuivre et à produire aussi un alliage plus homogène. »

Nous ne croyons pas devoir nous arrêter à ces considérations, qui ne sont pas en harmonie avec la théorie moderne des alliages.

Étude théorique (Album, Pl. XLIX, Phot. 195 et 196). — Cette étude théorique est loin d'être complète.

M. Guillemin a présenté une remarquable *Note sur la métallographie microscopique des alliages de cuivre* à la Commission des Méthodes d'essai (1894). Il y a montré que le phosphore produit un quadrillage absolument caractéristique et souvent même une sorte de feuille de fougère ou de branche de sapin qu'il est difficile de confondre avec une autre microstructure.

Toutefois, il est à noter que la présence dans un bronze phosphoreux d'une proportion de zinc égale ou supérieure à 4 0/0 rend moins nette et moins lisible la réaction micrographique du phosphore. Mais il suffit de refondre la prise d'essai pour vaporiser une partie du zinc et faire réapparaître le quadrillage caractéristique du phosphore.

Dans les essais micrographiques que nous avons faits sur les bronzes phosphoreux, nous avons noté que le phosphore paraît entrer dans la solution α.

Étude industrielle. — FABRICATION. — On n'ajoute jamais directement le phosphore à l'alliage cuivre-étain fondu. Mais on prépare dans une première opération un alliage de cuivre et de phosphore ou d'étain et de phosphore, que l'on ajoute en quantités convenables.

Nous verrons la préparation de ces alliages aux chapitres XII et XIII (*Autres alliages de cuivre* et *Alliages d'étain*).

La fusion se fait dans l'ordre suivant : cuivre — déchets

(s'il y a lieu) — étain — zinc (s'il y a lieu); puis on sort le creuset du four et, après avoir écumé, on ajoute le phosphore en remuant avec grand soin. On écume à nouveau et l'on coule.

Le principe essentiel de la fabrication des bronzes phosphoreux est de ne pas ajouter un excès de phosphore, lequel, nous le verrons, ne présente que de graves inconvénients. Il faudrait pouvoir calculer aussi exactement que possible la quantité de phosphore nécessaire pour détruire les oxydes formés pendant la fusion.

Le phosphure de cuivre, qui est plus usité que le phosphure d'étain, est généralement à 8 ou 10 0/0 de phosphore environ, ou à 15 0/0.

La refonte du bronze phosphoreux ne présente aucune difficulté particulière. La présence du phosphore diminue sensiblement les pertes en étain.

Si, dans la première coulée du lingot, il n'a été mis que la quantité exactement nécessaire pour détruire les oxydes, il faudra, au moment de la deuxième fusion, ajouter une nouvelle quantité de phosphore.

Lorsqu'on coule un bronze phosphoreux à trop haute température, il *roche* pendant la solidification.

« On voit, dit M. Guillemin dans le rapport si souvent cité, on voit sortir des têtes de jets et des parties à jour des masselottes, des filaments vermiculaires liquides qui s'amassent en forme de champignons. La composition de ces filaments est bien différente de celle de la pièce coulée. L'étain et le phosphore s'y trouvent en proportion beaucoup plus considérable que dans le corps de la pièce. La micrographie met en vue les canaux qui ont permis l'écoulement des filaments et qui forment des piqûres. »

Propriétés. — D'après ce que nous venons de dire sur le rôle épurateur du phosphore, on conçoit aisément que, ce corps n'étant pas en excès, les propriétés des bronzes phosphoreux soient celles des bronzes ordinaires, dont ils découlent, mais améliorés.

Si l'on ajoute un excès de phosphore, la résistance et la malléabilité décroissent assez vite.

La présence de légères traces de phosphore ne diminue nullement la ductilité du métal; au contraire, elle l'augmente plutôt par destruction complète des oxydes métalliques.

En 1870, MM. Montefiore et Kunzel firent des essais comparatifs qui donnèrent des résultats intéressants que l'on peut résumer par le tableau suivant, dans lequel il manque malheureusement les analyses.

MÉTAL	E	R	A 0/0
Bronze ordinaire (?) fondu.........	12,0	16,1	2
Le même, brassé au bois vert......	12,4	17,5	2,8
Le même, légèrement phosphoreux	13,5	25,8	6,8

M. Guillemin, dans la note déjà citée, a donné quelques résultats d'essais mécaniques sur des bronzes phosphoreux.

TYPE	COMPOSITION					R	E	A 0/0
	Cu	Sn	Zn	Pb	Ph			
Non phosphoreux ...	89,9	9	1,5	0,5	0	28	14	24
Phosphoreux........	89	9	1,5	0,5	traces	32	16	41
—	89	9	1,5	0,5	0,13	28	14	19
Pour coussinets.....	83,5	16	0	0	0,50	24	18	8
—	85,6	14	0	0	0,40	22	17	12
Bronze à canons légèrement phosphoreux étiré à froid et recuit	»	»	»	»	»	40	12	67

Nous avons étudié un grand nombre de bronzes phospho-

reux en faisant une série d'échantillons de bronzes du type

Cu	90
Sn	10
Zn	traces

dans lesquels nous avons incorporé des doses de plus en plus fortes de phosphore.

Voici les résultats de nos observations :

Cu	Sn	Ph	Zn par différence	R	E	A 0/0	Σ	CHOC	DURETÉ
90,93	9,03	0	»	24,6	9,3	23	43,7	5	63
90,85	8,92	traces	0,23	26,5	11,3	30	52,1	5	71
89,18	9,60	0,47	0,75	21,4	9,3	6	8,4	3	60
89,07	9,78	0,91	0,44	18,7	9,3	4	2,8	2	65
88,83	9,18	0,92	1,07	17,3	10,3	3,5	1,4	2	63
88,80	9,32	1,17	0,71	18,7	8,6	2,5	1,4	1	64

Ces résultats montrent que :

1° Le phosphore commence par augmenter la charge de rupture et cela tant qu'il n'y en a que des traces ;

2° Dès que la teneur de phosphore augmente un peu la charge de rupture et la résistance au choc s'abaissent ; ainsi que les allongements et la striction dont les diminutions sont très rapides, tandis que la limite élastique et la dureté restent sensiblement constantes.

Voici, d'autre part, les résultats qui sont garantis par la maison Garnier et Coutaud dont M. Guillemin est l'ingénieur-conseil.

BRONZES PHOSPHOREUX RÉSISTANTS

NUMÉROS	TENEUR en ÉTAIN	CLASSIFICATION	APPLICATION	CARACTÉRISTIQUES — A LA TRACTION — Résistance élastique Et	Résistance à la rupture Rt	Allongement At	A LA COMPRESSION — Résistance élastique Ec	Rupture Rc	Affaissement Ac
	Bronzes phosphoreux		pour frottement rotatif sur	kilogrammes par millimètre carré		pour 100	kilogrammes par millimètre carré		p. 100
0	18 à 20	Extra-dur	Acier trempé	21 à 25	21 à 25	0	55	100	25
2	16 à 18	Extra-dur	Acier trempé	18 à 25	18 à 25	0	50	110	30
4	14 à 16	Très dur	Acier cémenté	18 à 20	25 à 28	1 à 2	45	125	35
6	12 à 14	Dur	Acier dur	14 à 17	26 à 30	5 à 9	40	175	40
8	10 à 12	Mi-dur	Acier mi-dur	12 à 15	26 à 32	15 à 25	30	200	45
10	8 à 10	Mi-dur	Acier mi-dur	11 à 14	23 à 30	10 à 35	30	210	50

Nous verrons plus loin l'intérêt que présente le bronze phosphoreux comme métal à frottement.

Utilisation. — On peut dire qu'à l'heure actuelle il n'est fait que bien peu de bronzes pour constructions mécaniques qui n'aient été traités par le phosphure de cuivre.

Il arrive fort souvent — et nous en citerons tout à l'heure de nombreux exemples — que le phosphore, se trouvant en quantité extrêmement faible, en traces, peut à peine se voir par l'analyse chimique et que le molybdate d'ammoniaque — réactif cependant très sensible — donne à peine la coloration jaune du phosphomolybdate, caractéristique de la présence du phosphore.

Au point de vue de leur utilisation, les bronzes phosphoreux doivent donc subir les mêmes subdivisions que les bronzes ordinaires pour constructions mécaniques.

Nous citerons les principaux types :

Bronze pour laminage, étirage, fabrication des fils :

Cu	95 à 96
Sn	5 à 4
Ph	traces

(Nous indiquerons toujours le phosphore en plus du mélange pour 100 de cuivre et d'étain, lorsqu'il ne s'agira que de traces.)

Bronze pour soupapes, accessoires de machines à vapeur, etc. :

Cu	93
Sn	7
Ph	traces

Bronze pour engrenages :

Cu	89 à 90
Sn	11 à 10
Ph	traces

Voici les résultats d'analyse que nous avons faites sur quelques bronzes d'engrenages de marques françaises et étrangères, notamment anglaises :

NUMÉROS	Cu	Sn	Ph	Zn	Pb	Fe	As	Mn
1	87,60	11,57	0,21	»	traces	0,26	»	»
2	89,15	10,33	0,09	0	»	0,10	»	»
3	89,17	10,40	0,06	0	»	0,10	0,02	traces
4	89,26	9,93	0,43	0	»	0,13	»	»
5	91,78	8,89	traces	»	»	0,20	»	»

D'après les expériences pratiques qu'il nous a été donné de faire sur ces différents bronzes, nous pouvons conclure que les numéros 1, 2 et 3 ont donné de très bons résultats ; le numéro 4 s'est brisé dès les premiers chocs ; ceci doit être attribué à la présence du phosphore en excès, rendant le bronze brisant et dur.

Le numéro 5 a été mis assez rapidement hors d'usage ; mais ici les dents se déformaient ; la dureté de l'alliage ne semblait pas suffisamment grande.

En résumé, le type qui semble être le plus convenable pour

les engrenages est bien celui que **nous** avons indiqué ci-dessus.

Le même métal peut être employé pour des fusées d'axe, des cylindres de pompes à vapeur, etc.

Bronzes pour coussinets. — Les bronzes pour coussinets se ramènent généralement au type suivant :

Cu	82 à 86 0/0
Sn	18 à 14 0/0
Ph	traces à 0,25 0/0

Plus le métal renferme d'étain et de phosphore, plus grande est sa dureté.

Voici les principaux résultats de très nombreuses analyses que nous avons faites sur des bronzes destinés au frottement :

NUMÉROS	Cu	Sn	Ph	Zn	Pb	Fe	As	Sb
1	82,48	15,72	0,13	traces	0,27	1,00	0,11	0,35
2	83,49	13,65	traces	»	1,95	0,15	0,15	»
3	83,18	15,16	traces	0,53	0,36	0,25	0,14	»
4	82,99	15,90	traces	traces	0,26	0,30	»	»
5	84,20	15,48	0,07	»	0,04	»	0,02	»
6	86,38	13,40	0,09	»	0,03	»	0,02	»
7	85,51	13,25	traces	»	1,48	»	0,04	»
8	83,93	14,13	0,20	1,23	traces	0,10	»	»
9	82,30	16,80	traces	traces	traces	0,25	»	»
10	82,59	15,87	traces	0,16	traces	0,17	»	»
11	84,80	15,05	traces	traces	0,40	0,15	»	»
12	84,86	14,92	0,08	traces	0,30	0,09	»	»
13	84,09	13,46	traces	1,84	0,34	0,32	»	»

On remarquera que :

1° Dans la plupart de ces métaux on ne trouve que des traces de phosphore ;

2° Tous ces alliages peuvent être ramenés à quelques types, et nous pouvons ajouter que les alliages numéros 4, 5 et 6 ont été étudiés par l'une des premières fonderies de cuivre de

France pour répondre à tous les désidérata des industriels sur les bronzes à frottement ;

3° Un grand nombre de ces bronzes ont été préparés avec des métaux très purs.

Il faut toutefois ajouter qu'en dehors de ces types on utilise parfois des métaux plus riches en cuivre. C'est ainsi que nous avons rencontré des coussinets employés en Angleterre correspondant aux deux types :

1°	Cu	88,19
	Sn	10,95
	Ph	0,88
	Zn	0,20
	As	0,08
	Fe	traces
	Pb	traces
2°	Cu	90,05
	Sn	9,25
	Ph	0,23
	Zn, As, Fe, Pb	traces

Il faut encore donner la composition :

Cu	79,7
Sn	10,0
Pb	10,0
Ph	0,3

Ce dernier bronze est cité par Dudley et Pease et serait employé par la Compagnie des Chemins de fer de Pensylvanie.

Enfin certains bronzes phosphoreux contiennent des quantités importantes de zinc ou de plomb. — En voici deux exemples courants :

Cu	83,70	84,80
Sn	8,00	7,00
Zn	8,00	4,00
Ph	0,30	0,20
Pb	0,00	4,00

Nous discuterons la valeur de ces métaux, au point de vue frottement à la fin du chapitre sur les *Antifrictions*.

Bronzes pour fils électriques. — Le bronze phosphoreux est uti-

lisé pour la confection des fils employés dans les installations électriques; bien que leur conductibilité ne soit pas élevée, leur haute résistance les recommande. On arrive fort bien à faire des fils qui résistent à 90 et même 100 kilogrammes par millimètre carré de section. On utilise quelquefois ceux à 90 kilogrammes, qui n'offrent que 25 0/0 de la conductibilité du cuivre pur. Ils sont usités surtout en téléphonie; le plus employé est celui dont la conductibilité est égale à 30 0/0 de celle du cuivre pur. Ils permettent d'avoir de plus longues portées qu'avec les fils en cuivre.

Il faut noter ici que le métal qui est vendu partout sous le nom de bronze télégraphique et de bronze téléphonique n'est généralement pas autre chose que du cuivre pur ou légèrement silicié. Nous en parlerons plus loin.

BRONZES AU MANGANÈSE ET BRONZES AU PHOSPHORE ET AU MANGANÈSE

Bronzes au manganèse (Pl. L, Phot. 197 et 198). — Il ne faut confondre le bronze au manganèse ni avec les laitons au manganèse qui sont toujours vendus sous ce nom, ni avec les alliages cuivre-manganèse employés pour les barres d'entretoises de foyer de locomotives. Nous appellerons *bronzes au manganèse* des alliages de cuivre et d'étain renfermant de faibles quantités de manganèse. Les laitons au manganèse renferment du cuivre, du zinc et des quantités souvent importantes de manganèse, jusqu'à 4 et même 5 0/0 de manganèse. Ils seront étudiés au chapitre des *Laitons spéciaux*.

Nous n'envisagerons donc ici que les alliages de cuivre et d'étain renfermant du manganèse. Disons de suite que ceux-ci sont d'un usage peu fréquent.

On pourrait croire que le rôle du manganèse se rapproche de celui du phosphore, c'est-à-dire qu'il joue l'office de réducteur, tel que nous l'avons déjà expliqué à propos de son utilisation en sidérurgie.

Il n'en semble rien être; il a été fait, dans une grande

forge de la Marine française, de nombreux essais de bronze contenant de 2 à 10 0/0 d'étain, dans lesquels on ajoutait des quantités connues et parfaitement dosées de manganèse. On les retrouvait intégralement après la coulée ; mais le manganèse augmente la charge de rupture et les allongements.

Voici, à titre purement documentaire, une circulaire adressée par M. Manhès au début de cette fabrication (31 mars 1878).

« *Définition du procédé.* — Le cuivre du commerce et ses alliages, quel que soit leur mode de préparation, renferment toujours une proportion plus ou moins forte d'oxydes, qui nuisent beaucoup aux qualités utiles qui seraient propres à ces métaux. En effet, ces oxydes irrégulièrement disséminés dans la masse du métal, empêchent son homogénéité parfaite, condition essentielle pour obtenir le maximum de résistance, de ténacité et de malléabilité. Mon procédé a pour but l'élimination complète de l'oxygène renfermé dans le métal, résultat qui ne peut être obtenu que par l'interposition d'un corps ayant pour l'oxygène beaucoup plus d'affinité que le cuivre, condition que remplit le manganèse, métal qui a, en outre, l'avantage d'être à peu près fixe à la température de fusion du cuivre, ce qui permet un dosage exact.

« De nombreuses et sérieuses expériences ont démontré que le cuivre affiné par le manganèse est d'une homogénéité parfaite et ne présente pas ces petites cavités brillantes que l'on voit toujours dans la cassure du cuivre affiné par les procédés ordinaires ; que le cuivre, le bronze, le laiton traités par ce procédé sont doués d'une résistance, d'une ténacité, d'une malléabilité bien supérieures à celles habituelles à ces métaux.

« Mon cupro-manganèse en lingots ou en grenailles est au titre régulier de 75 0/0 de cuivre, 25 0/0 de manganèse.

« *Instruction pour l'emploi.* — Qu'il s'agisse de la fabrication du cuivre, du bronze ou du laiton, il n'y a rien à changer dans a marche des opérations métallurgiques, et le traitement spécial n'a lieu que lorsque le métal est prêt à être coulé. Il faut alors couvrir le bain métallique avec du charbon de bois concassé mélangé d'une petite quantité d'un flux alcalin, tel que

le carbonate de soude, borax, etc.; le premier a pour but d'empêcher les effets de l'oxydation par l'air atmosphérique, et le second de scorifier l'oxyde de manganèse qui se produit par la réduction des autres oxydes métalliques.

« On laisse tomber doucement dans le métal la quantité voulue de cupro-manganèse, on laisse chauffer pendant quelques instants pour que sa fusion soit bien complète, on agite vivement le métal pour rendre le mélange plus intime, on laisse encore reposer quelques instants pour que la réaction se produise bien et l'on procède à la coulée comme d'ordinaire. Il est préférable d'introduire le cupro-manganèse dans le métal, après l'avoir préalablement fondu sous le charbon dans un creuset de plombagine; on évite ainsi le refroidissement du bain métallique.

« Il est bon d'observer, pour le bronze, que ce métal, lorsqu'on le traite par mon procédé, ne doit pas contenir plus de 10 0/0 d'étain comme maximum; au delà, le métal est cassant.

« *Proportions à employer.* — L'expérience m'a fait reconnaître que les proportions de cupro-manganèse qui donnent les meilleurs résultats sont les suivantes :

« Pour le bronze :

3 à 4 kilog. cupro-manganèse pour 100 kilog. de bronze;

Pour le laiton :

0,250 à 1 kilog. cupro-manganèse pour 100 kilog. de laiton;

Pour le cuivre rouge :

0,250 à 1kg,200 cupro-manganèse pour 100 kilog. de cuivre. »

D'après les essais micrographiques que nous avons faits, le manganèse paraît se porter sur la solution α tout comme le zinc (Phot. 197 et 198, Pl. L).

Nous ne parlons pas ici de la fabrication proprement dite du bronze au manganèse; elle est semblable à celle des laitons que nous décrirons en détail au chapitre x (*Laitons spéciaux*).

Nous avons fait une étude systématique de l'influence du manganèse sur le bronze renfermant :

Cu	90
Sn	10
Zn	traces

Nous avons substitué le manganèse au cuivre.

COMPOSITION				PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES					
Cu	Sn	Mn	Zn par différence	R	E	A 0/0	Σ	CHOC	DURETÉ
90,93	8,82	0	0,25	24,6	9,3	23	43,7	5	63
90,12	9,20	traces	0,68	26,9	9,1	28	41,3	4	54
87,64	10,41	1,67	0,28	21,5	10,1	20	12,0	3	51
89,38	8,61	0,69	1,33	16,4	9,8	7,5	15,2	4	60
85,87	8,76	3,10	2,27	11,8	11,8	0	2,8	2	71
82,84	9,34	6,84	0,98	N'ont pas pu être obtenus sains					
79,18	9,31	11,04	0,47	id.					

Ces essais montrent bien que le manganèse commence par augmenter la charge de rupture et surtout les allongements.

Mais, dès que la teneur en manganèse dépasse 2 0/0, il y a une baisse rapide de la charge de rupture, des strictions et des allongements, ces derniers devenant nuls pour une teneur de 3 0/0.

La dureté n'est pas sensiblement accrue, et la fragilité ne diminue pas rapidement.

Les types de bronzes au manganèse de l'industrie renferment de 1 à 3 0/0 de ce métal et plus généralement 1 0/0.

En voici quelques types :

	1	2	3	4	5
Cu	92	88,4	84	84	82
Sn	8	10	14	13	15
Mn	1	1,6	2	3	3

Très souvent ces bronzes contiennent 4 à 5 0/0 de zinc et

du plomb. Voici deux alliages utilisés pour les appareils hydrauliques à haute pression :

Cu	82	83,5
Sn	8	8
Zn	5	5
Pb	3	3
Mn	2	0,5
	100	100,0

Il faut ajouter que ceux de ces alliages qui renferment moins de 90 0/0 de cuivre sont très peu usités.

Bronzes au manganèse et au phosphore. — Nous avons dit que le manganèse ne paraît pas jouer le rôle de désoxydant, comme on l'a cru ; on conçoit donc aisément que l'on ait songé à faire des bronzes qui soient épurés par le phosphore et qui renferment du manganèse.

La méthode à utiliser est toujours la même : l'addition du phosphure de cuivre doit être telle qu'il ne reste après la coulée que des traces de phosphore. Le manganèse peut s'élever à 1 0/0 environ. On a préconisé tout particulièrement pour les hélices un bronze ayant pour composition :

Cu	92
Sn	8
Zn	3
Mn	0,50
Ph	traces
Total	103,50

Cet alliage donne :

R	26
A 0/0	40

Un tel bronze est ordinairement très sain ; il n'en est plus ainsi si l'on supprime le zinc.

Lorsque la teneur en cuivre tombe au-dessous de 90 0/0, le bronze est moins malléable que lorsqu'il ne contient pas de manganèse. Le contraire est à noter pour les alliages renfermant plus de 90 0/0 de cuivre.

BRONZES AU SILICIUM

Étude théorique. — Le silicium joue dans le bronze le même rôle que le phosphore; il réduit les oxydes métalliques en donnant de la silice qui, avec les oxydes non réduits, forme des silicates fusibles.

L'introduction du silicium dans la fabrication des bronzes a eu un autre but que l'obtention de bronzes résistants. M. Weiller, d'Angoulême, fit, en 1881, des expériences sur la qualité de certains bronzes pour leur emploi en télégraphie et téléphonie.

Il démontra que les fils en cuivre phosphoré présentent une conductibilité beaucoup plus élevée que le fer ou l'acier (environ deux fois et demie plus grande), mais moindre d'un tiers environ que celle du cuivre rouge.

Il chercha alors à conserver au bronze les qualités mécaniques qu'il possède, en lui donnant une conductibilité électrique aussi proche que possible de celle du cuivre.

Il fut ainsi conduit à faire des bronzes au silicium.

Aucune étude systématique n'a encore été faite sur les bronzes au silicium.

Étude industrielle. — Les alliages sont obtenus en ajoutant avant la coulée la dose convenable de cupro-silicium. Celui-ci peut contenir 10, 20 et même 50 0/0 de silicium. Nous en étudions, d'autre part, la constitution et la fabrication. (Voir chapitre xi.)

La dose de cupro-silicium à ajouter doit être calculée de façon que le silicium ne serve que comme épurateur.

Le silicium apporte à peu près les mêmes propriétés que le phosphore.

Dans le rapport déjà cité, M. Guillemin donne l'exemple d'un

bronze affiné par le silicium et n'en renfermant que des traces. Il avait pour composition :

Cu	89
Sn	9
Zn	1,5
Pb	0,5
Si	traces

Les propriétés mécaniques étaient :

R	27
E	16
A 0/0	20

L'industrie utilise bien peu le bronze silicié. Mais il ne faut pas confondre le bronze silicié, alliage de cuivre, d'étain et de silicium avec les alliages cuivre-silicium, vendus très souvent sous ce nom et dont nous parlons plus loin.

BRONZES A L'ALUMINIUM

Étude théorique (Album, Pl. L, Phot. 199 et 200). — Il ne faut pas confondre les *bronzes à l'aluminium* et les *bronzes d'aluminium*. Ces derniers sont des alliages de cuivre et d'aluminium que nous étudierons en détail au chapitre suivant, tandis que les bronzes à l'aluminium sont des alliages de cuivre et d'étain, dans lesquels on a incorporé des quantités plus ou moins importantes d'aluminium.

Il est bien évident que le principal rôle de cet aluminium est de réduire les oxydes.

L'étude micrographique que nous avons faite de ces alliages nous a montré que l'aluminium semble se porter sur la solution α, tout comme le zinc et le manganèse. Il est même à noter que le bronze dans lequel on introduit de l'aluminium semble à plus faible teneur en cuivre qu'il ne l'est en réalité.

Étude industrielle. — La fabrication est semblable à celle des laitons à l'aluminium qui sera décrite au chapitre suivant. Mais ici la quantité d'aluminium ajoutée ne doit servir que d'épurateur.

Dans son *Rapport à la Commission des Méthodes d'essais*, M. Guillemin cite les propriétés d'un bronze épuré à l'aluminium. La composition est :

Cu	89
Sn	9
Zn	1,5
Pb	0,5
Al	traces

Il a donné :

R	31
E	15
A 0/0	43

Nous avons étudié quelques bronzes à l'aluminium préparés en partant du type :

Cu	90
Sn	10

dans lesquels nous avons substitué à l'étain des quantités de plus en plus importantes d'aluminium.

Voici les résultats que nous avons obtenus :

COMPOSITION			PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES					
Cu	Sn par différence	Al	R	E	A 0/0	Σ	CHOC	DURETÉ
90,93	9,00	0,07	23,5	11,8	26,2	34,0	5	50
89,66	9,87	0,47	15,8	9,2	2	1,4	3	57
89,54	9,70	0,76	12,9	7,7	2	0	3	61
89,05	8,74	2,21	12,9	7,7	2	2,8	2	63
90,71	5,18	4,11	10,0	6,5	5	12,5	3	65
89,10	3,59	7,31	17,1	12,5	3	13	3	63

Ces résultats très intéressants montrent que des traces d'aluminium n'ont pas grande influence sur les propriétés mécaniques du bronze.

Dès que la teneur en aluminium atteint 0,4, la charge de rupture descend très brusquement, ainsi que la limite élastique. Quant aux allongements et aux strictions, ils sont extraordinairement faibles. La fragilité augmente très rapidement.

La dureté est peu influencée par l'aluminium.

On doit donc conclure de ces essais que l'aluminium est un métal nuisible aux propriétés des alliages cuivre-étain.

BRONZES AU CHROME ET AU TUNGSTÈNE

On a fait, en Allemagne, croyons-nous, quelques essais sur les bronzes au chrome et au tungstène; ils n'ont pas donné de résultats.

Voici la composition de deux échantillons que nous avons recueillis dans un de nos voyages en Allemagne.

Premier échantillon :

Cu	84,25
Sn	14
Cr	1,75
Zn	traces
Ph	traces

Deuxième échantillon :

Cu	82,50
Sn	15,50
W	1,50
Zn	0,50
Ph	traces

Ces bronzes avaient été essayés au frottement sur acier demi-dur non trempé. Ils avaient donné de plus mauvais

résultats que les bronzes ordinaires de frottement. En les observant au microscope, nous avons pu mettre en évidence le chrome et le tungstène; ces métaux gardent absolument leur personnalité.

Nous aurons d'ailleurs à revenir avec quelques détails sur ce point lorsque nous parlerons, au chapitre XI, des alliages cuivre-chrome et cuivre-tungstène.

Quant aux essais, fort restreints, d'ailleurs, qui ont été faits pour l'emploi du chrome et du tungstène dans les bronzes subissant d'autres travaux que le frottement, ils ont fourni les résultats les plus détestables. Ceci s'explique aisément par l'existence de grains de chrome ou de tungstène.

En résumé, ces bronzes n'ont été jusqu'ici le sujet que de recherches très peu importantes. Mais ils ne semblent devoir donner aucun résultat.

BRONZES AU VANADIUM

Les bronzes au vanadium ont été encore très peu étudiés. Dans une étude parue sous la signature de M. Baxérès en 1901, il était bien indiqué que les bronzes vanadiés donnaient 71 kilogrammes de charge de rupture et 12 0/0 d'allongement, mais sans indications d'analyses[1]. Nous examinerons, à propos des alliages de cuivre et de vanadium (chap. X), les grosses difficultés que présente cette fabrication.

AUTRES BRONZES

Nous ne pouvons clore ce chapitre sans dire un mot des essais qui ont été faits en Allemagne sur les bronzes au fer lancés sous le nom de bronzes aciérés.

1. Baxérès, *Revue minière et métallurgique des Ingénieurs*. Madrid, 1901.

Les essais qui ont été effectués ont porté sur des bronzes à frottement et sur des bronzes soumis au choc.

Les bronzes au fer n'ont donné, assure-t-on, aucun bon résultat.

Nous n'avons eu aucun échantillon de ces alliages entre les mains, et nous ne pouvons que répéter les renseignements extrêmement vagues qui nous ont été communiqués dans un de nos récents voyages en Allemagne.

Ajoutons qu'il était bien question de bronze au fer, et non d'alliages cuivre-fer, qui ont été essayés il y a quelques années pour les coussinets; nous croyons même que des essais ont été faits sur ces derniers dans l'artillerie française.

CONCLUSIONS

En résumé, les principaux bronzes spéciaux actuellement utilisés sont en dehors des bronzes au zinc :

1° Les *bronzes au plomb :* le plomb garde sa personnalité et vient aider considérablement le frottement en agissant comme corps gras ;

2° Les *bronzes au plomb et au nickel :* qui ont une très haute teneur en plomb et dont le nickel a pour but d'empêcher la ségrégation du plomb ;

3° Les *bronzes au phosphore*, *au manganèse*, *au silicium et à l'aluminium*, qui sont, en somme, des bronzes épurés, ces produits n'intervenant guère que comme réducteurs, à l'exception toutefois du manganèse.

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE VIII

OUVRAGES GÉNÉRAUX

Hiorns, *les Alliages métalliques* (traduction Boudouard), Steinheil, éditeur, p. 162 à 243 (*Généralités*).

Knab, *Traité des Alliages métalliques*, Steinheil, éditeur, p. 31 à 224 (*Id.*).

Krupp, *Die Legierungen*, Vienne, 1894, p. 144 (*Généralités*).

Ledebur, *les Alliages métalliques, leurs emplois dans l'Industrie*, Fritsch, 1894 (*Id.*).

Thurston, *Alloys Brasses and Bronzes*, John Willey and Sons, éditeur, New-York, 1903 (*Id.*).

MÉMOIRES PARTICULIERS

Baxérès, *Revue minière et métallurgique*, Madrid, 1901 (*Bronzes au vanadium*).

Charpy, *Étude sur les antifrictions. Contribution à l'étude des Alliages métalliques*, p. 236 (*Bronzes au plomb*).

Clamer, *Journal of the Franklin Institute*, CLVI, p. 49, 1903 (*Bronzes au plomb et au nickel*); — *Railroad Gazette*, 787, 1903 (*Id.*); — *Revue de Métallurgie* (extraits) (*Id.*).

Dudley, *Revue générale des Chemins de fer*, juin 1893 (*Bronzes au plomb*).

De Ruolz et de Fontenay, *Comptes Rendus*, 15 octobre 1871 (*Bronzes phosphoreux*).

Friéger, *Alliages de Manganèse* (*Bulletin de la Société chimique*, IV) (*Bronzes au manganèse*).

Guillemin, *Commission des méthodes d'essais*, 1894 (*Divers bronzes spéciaux*).

Moissan, *Encyclopédie chimique : le Manganèse*, Paris, 1886 (*Bronzes au manganèse*).

Nicolardot, *le Vanadium* (collection Léauté), 1905 (*Bronzes au vanadium*).

Rousseau, *Encyclopédie chimique : Cuivre*, Paris, 1889 (*Bronzes divers*).

Terreil, *Alliages de Manganèse* (*Bulletin de la Société chimique*, XXI, 1874) (*Bronzes au manganèse*).

Valenciennes, *Comptes Rendus*, LXX, 1870 (*Id.*).

Vinçotte et Mame, *Congrès des Mines et de la Métallurgie*, 1889 (*Bronzes phosphoreux*).

Weiller (Lazare), *Nouveaux alliages industriels* : Congrès de métallurgie, 1900 (*Divers bronzes spéciaux*).

CHAPITRE IX

ALLIAGES DE CUIVRE ET DE ZINC
LAITONS ORDINAIRES

Nous appellerons *laitons* tous les alliages de cuivre et de zinc ; au cours de cette étude, nous verrons que ces alliages reçoivent des noms différents suivant leurs teneurs en cuivre et que l'on appelle plus spécialement laitons les alliages d'une teinte franchement jaune.

Bien que ces alliages aient été connus dès la plus haute antiquité, ils prirent leur développement en Angleterre, où la fabrication a été introduite, vers 1740, par les Turner. Des usines importantes s'élevèrent à Bristol, Macclesfield et Cheadle, etc. Comme nous le verrons, le laiton y était obtenu par un ancien procédé complètement abandonné à l'heure actuelle. En France, cette fabrication s'est développée d'une façon toute particulière dans le département de l'Eure. Il faut, croyons-nous, attribuer ce fait à l'existence dans cette contrée d'importantes forêts qui permettaient d'alimenter les usines en bois, seul combustible utilisé, pendant de longues années, pour le recuit des alliages de cuivre.

I. — ÉTUDE THÉORIQUE

Courbes de fusibilité et de refroidissement. — Mallet fut le premier à déterminer les points de fusion de différents alliages de cuivre-zinc, et il montra qu'aux environs de 33 0/0 de cuivre le point de fusion tombait presque subitement.

M. Charpy reprit la question avec une grande précision ; il obtint les résultats suivants, qui sont résumés dans la courbe (*fig.* 162) et le tableau ci-dessous :

CUIVRE P. 100	POINTS DE FUSION	CUIVRE P. 100	POINTS DE FUSION
100	1.054	51,0	860 à 845
90,5	1.020	39,7	820 à 805
80,3	1.000	31,0	790
69,5	945	25,1	700
60,2	880	20,4	600 à 585

En somme[1], on obtient deux courbes se rejoignant en un point qui correspond au composé $CuZn^2$ et au pourcentage de 32,8 de cuivre (*fig.* 162). M. Roberts-Austen appliqua sa méthode[2] aux alliages cuivre-zinc ; il montra ainsi que les alliages renfermant moins de 30 0/0 de zinc n'ont qu'un seul point de solidification, très peu différent de celui du cuivre. Les alliages contenant plus de 30 0/0 de zinc ont un second point de solidification peu supérieur à celui du zinc. Enfin MM. Heycock et Neville étudièrent les alliages très riches en zinc et prouvèrent que jusqu'à 1 0/0 de cuivre (proportion comptée en nombre d'atomes pour 100) les points de fusion se trouvent sur une droite qui part du point de fusion du zinc, et que, pour les alliages renfermant de 3 à 7 0/0 de cuivre, on a une seconde droite presque horizontale et qui correspond à la température de 424°.

M. Shepherd a donné, il y a peu de temps, les résultats de ses recherches sur les alliages de cuivre-zinc (*The Journal of Physical Chemistry*, juin 1904, p. 421) ; bien qu'en contradiction sur quelques points avec les études antérieures, ce

1. M. Charpy nous a fait noter que le point anguleux marqué sur la courbe ne ressort pas nécessairement des mesures numériques et que la forme pouvait varier.

2. *Étude théorique des alliages métalliques*, par M. Léon Guillet, p. 39, Vve Dunod, éditeur, Paris.

travail précise d'une façon très nette la constitution de ces alliages. Nous en donnerons le résumé et les conclusions.

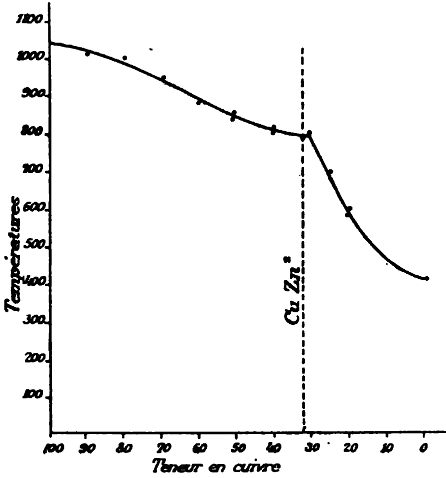


Fig. 162. — Courbe de fusibilité des alliages cuivre-zinc (Charpy).

L'observation des courbes de refroidissement a permis à M. Shepherd de retrouver la courbe publiée par M. Roberts-Austen ; elle a permis, en outre, de préciser un point qui avait presque échappé à ce savant ; mais l'on n'a pas retrouvé une droite qu'il avait indiquée.

Quant à la courbe de commencement de solidification ; elle est formée de six branches, auxquelles correspondent six phases, qui, d'après l'auteur, sont, toutes, des solutions solides : aucune n'est formée par un composé défini. Le tableau suivant résume la composition des phases.

COMPOSITION DU LIQUIDUS	COMPOSITION DU SOLIDUS	LIMITES DE COMPOSITION DES CRISTAUX A 400°
100 à 63 0/0 Cu	71 à 100 0/0 Cu	64 à 100 0/0 Cu
63 à 40 0/0 Cu	45 à 64 0/0 Cu	51 à 53,5 0/0 Cu
40 à 19 0/0 Cu	31 à 40 0/0 Cu	31 à 40 0/0 Cu
19 à 12 0/0 Cu	23 à 30 0/0 Cu	Instable
12 à 2 0/0 Cu	13 à 19 0/0 Cu	13 à 19 0/0 Cu
2 à 0 0/0 Cu	0 à 2,5 0/0	0 à 2,5 0/0 Cu

Le diagramme assez complexe que reproduit la figure 163 donne la composition des différents alliages aux différentes températures supérieures à 400° (au dessous il n'y a aucune transformation).

Ce diagramme a été obtenu non seulement au moyen des courbes de refroidissement, mais aussi par une étude micrographique très détaillée.

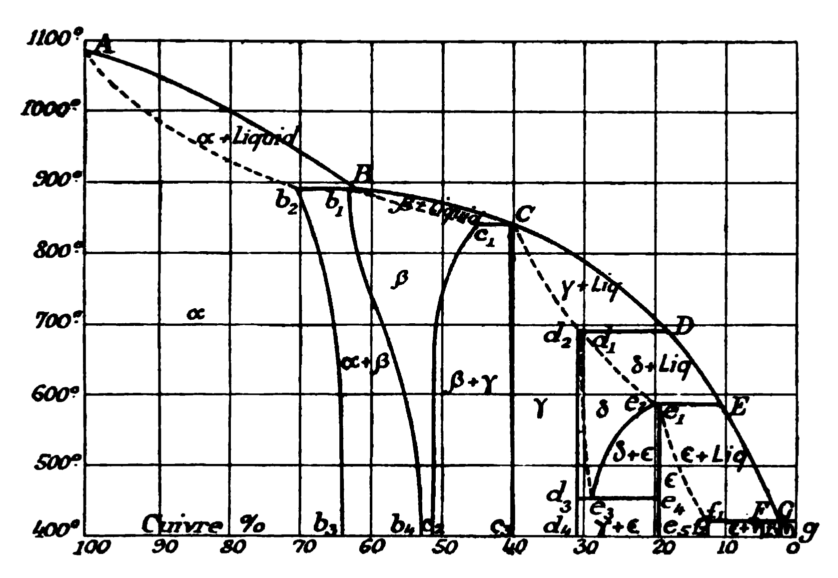


Fig. 163. — Diagramme des alliages cuivre-zinc (Shepherd).

Métallographie (Album, Pl. LI à LVI). — La micrographie des alliages cuivre-zinc a été étudiée par MM. Behrens, Charpy, H. Le Chatelier et tout dernièrement par M. Shepherd. M. Behrens admet l'existence des trois combinaisons suivantes :

$CuZn$; $CuZn^2$; $CuZn^4$.

La première correspond à 49 0/0 de zinc, la seconde à 67,8 0/0, et la troisième à 79,7 0/0.

Pour les laitons contenant plus de 80 0/0 de cuivre, on a, d'après M. Behrens, une structure analogue à celle du cuivre rouge; mais les cristaux sont entourés d'une substance jaune qui présente parfois un fil médian blanc. Avec les alliages

renfermant de 80 à 60 0/0 de cuivre, on obtient, d'après le même auteur, une structure se rapprochant de celle du bronze à 15 0/0 d'étain. Plus l'on se rapproche de l'alliage à 50 0/0, plus le métal tend vers l'homogénéité. A 50 0/0, on a un réseau à lignes courbes sur un fond uniformément jaune.

A 33 0/0 de cuivre, on se trouve en présence d'un alliage homogène. Pour des teneurs plus élevées en zinc, M. Behrens trouve des cristaux entourés d'une masse qui devient de plus en plus importante au fur et à mesure que la teneur en zinc augmente. L'alliage à 20 0/0 de cuivre donne une texture homogène ; de ce fait, M. Behrens conclut à l'existence possible du composé $CuZn^5$.

M. Charpy est arrivé aux conclusions suivantes : Les alliages riches en cuivre de 100 à 67 0/0 présentent des dendrites se rapprochant de celles des bronzes; ces cristaux seraient des mélanges isomorphes. Cette structure apparaît aisément par attaque à la potasse, à l'ammoniaque, aux acides étendus ou même simplement par oxydation.

Dans les alliages renfermant de 65 à 55 0/0 de cuivre, on obtient des cristaux à bords arrondis, entourés d'une masse en petits cristaux non dédoublables.

Les alliages qui renferment de 55 à 33 0/0 de cuivre sont constitués par de gros grains plus ou moins polyédriques séparés par un alliage blanc et semés de cristaux blancs.

Pour des teneurs comprises entre 33 et 20 0/0 de cuivre on obtient des cristaux blancs entourés d'un eutectique.

Enfin, pour les teneurs les plus élevées, on trouve des cristallites arrondies dans une masse que l'on ne peut dédoubler.

M. Charpy fait remarquer que les points de transition correspondent aux combinaisons $CuZn^2$, $CuZn^4$, Cu^2Zn et peut-être CuZn.

M. H. Le Chatelier a étudié la micrographie des alliages cuivre-zinc, en superposant du cuivre et du zinc fondus suivant la méthode que nous avons déjà signalée.

Il a mis ainsi en vue que les cristaux auxquels on attribuait la formule Zn^4Cu n'étaient pas homogènes ; en effet, après une

attaque profonde, les contours des cristaux sont très modifiés.

M. Le Chatelier retrouva aussi l'eutectique Zn^4Cu et Zn^2Cu, la combinaison Zn^2Cu et enfin les cristaux ZnCu qui forment le constituant des laitons forgeables, comme nous le verrons.

Ces importantes études semblaient bien prouver que les alliages zinc-cuivre bruts de coulée doivent être partagés en cinq groupes :

1° De 100 à 65 0/0 de cuivre : cristaux formés par des mélanges isomorphes;

2° De 65 à 55 0/0 de cuivre : cristaux de ZnCu ;

3° De 55 à 33 0/0 de cuivre : mélanges isomorphes avec petits cristaux blancs;

4° De 33 à 20 0/0 de cuivre : cristaux de Zn^2Cu;

5° De 20 à 0 0/0 de cuivre : cristaux de Zn^4Cu.

Mais il y a une autre question non moins intéressante; nous faisons allusion à l'influence des traitements sur la structure des alliages cuivre-zinc (Pl. LIII, Phot. 209 à 212). Si nous considérons les alliages renfermant plus de 65 0/0 de cuivre-zinc et si nous les recuisons à environ 600°, on voit se développer des cristaux à arêtes rectilignes; petit à petit la structure dendritique disparaît et bientôt ces cristaux envahissent toute la masse. Leur dimension est d'autant plus grande que la température de recuit est plus élevée. Il est bien évident qu'un traitement mécanique, tel que laminage, étirage, martelage, déforme les cristaux, et cela d'autant plus que l'écrouissage est plus prononcé. On peut d'ailleurs les reconstituer par un nouveau recuit.

Lorsqu'on atteint dans le recuit des températures élevées, telles que 800 à 900°, on obtient des cristaux extrêmement développés ; ce sont des octaèdres présentant de nombreuses mâcles. La micrographie donne, comme dans la ferrite, des faces éclairées et des faces sombres.

Si l'on examine ces cristaux à de très forts grossissements, on n'y découvre aucun détail.

On retrouve ces mêmes cristaux dans le cuivre rouge en l'attaquant par l'ammoniaque. M. Charpy pense que c'est une solution isomorphe de cuivre avec un composé défini zinc-cuivre.

Les conditions dans lesquelles s'opère la coulée a une influence très grande sur la grosseur de la structure dendritique. Ceci d'ailleurs est général pour tous les alliages; plus la température de coulée est élevée ou plus le refroidissement est lent et plus le grain du métal est gros. Au contraire, on obtient un métal à grains fins, en coulant à température basse et dans des moules permettant un refroidissement rapide.

Les alliages renfermant de 55 à 65 0/0 de cuivre ne sont pas sensiblement atteints par recuit ; les cristaux qu'ils renferment ne se développent pas. Il est un point particulièrement intéressant à signaler pour l'industrie : nous verrons plus loin que, lorsqu'on porte un laiton à trop haute température, en le recuisant, on obtient un métal qui ne possède plus aucune qualité mécanique; suivant l'expression consacrée, il est *brûlé*. On voit alors apparaître dans le métal des piqûres qui rappellent des bulles de gaz et, d'autre part, des fissures se forment faisant un véritable réseau autour des cristaux. M. Charpy a montré, nous l'étudierons plus loin en détail, qu'un laiton est d'autant plus facile à altérer par recuit qu'il contient plus d'impuretés. Il semble alors qu'il se forme autour des cristaux un alliage qui, amené à l'état fusible, dissout petit à petit les cristaux.

Dans l'important travail que nous avons déjà cité, Shepherd a étudié en détail la microstructure des alliages cuivre-zinc. Les réactifs employés ont été un mélange d'ammoniaque et d'eau oxygénée plus ou moins diluée ou la potasse diluée.

Voici ses principales conclusions :

Les alliages qui renferment plus de 70 0/0 de cuivre ne présentent pas de différence, qu'ils soient fondus ou recuits, ainsi que le fait prévoir le diagramme (*fig*. 163). Ils présentent tous des dendrites bien connus rappelant la phase α des bronzes (Pl. LI, Phot. 201 et 202); quand on recuit ces alliages, on fait

disparaître le réseau de dendrites et on obtient de grandes plages uniformes.

Pour des concentrations qui correspondent à la partie BC du liquidus, les cristaux β se séparent d'abord (Pl. LI, phot. 203). Ils ont une couleur de cuivre brillant.

Si on trempe un des alliages situé dans l'aire b_1, b_2, b_3, b_4, on trouve des polyèdres formés par une solution solide $\alpha + \beta$, tandis que, si l'on considère l'alliage recuit à 700°, ou au dessous, on trouve des cristaux de α, qui se sont séparés de la solution solide $\alpha + \beta$.

Entre 54 et 51 0/0 de cuivre, on a du β pur, qui ne se dissocie jamais par le recuit (Pl. LI, Phot. 204).

L'alliage à 50 0/0 trempé à 800° dans l'eau donne du β pur. S'il est trempé à température plus basse, les cristaux γ se séparent de la masse (Pl. LI, Phot. 205). Le recuit développe d'ailleurs ces cristaux. Pour les alliages de la région $Cc_1c_2c_3$, on obtient un mélange de $\beta + \gamma$. — Dans l'espace $c_3Cd_2d_4$ on obtient le constituant γ pur.

Pour les produits renfermant moins de 31 0/0 de cuivre, le diagramme indique très nettement les transformations qui ont lieu.

C'est ainsi que les alliages à 28 et 30 0/0 de cuivre donneront des résultats très différents, s'ils ont été recuits au-dessous ou au-dessus de 450°; on trouve dans les premiers cas un mélange γ et δ.

Quand on recuit et trempe à 640° l'alliage à 30 0/0, on trouve de grands lobes arrondis de δ incorporés dans un magma sombre. Entre 12 et 2,5 0/0 de cuivre, le métal fondu et recuit se ressemble beaucoup. Ceci est logique, puisque la phase est stable à toute température inférieure au point de fusion.

Les alliages renfermant moins de 2,4 0/0 de cuivre sont tous semblables comme structure ; ils sont homogènes après recuit.

Parmi les déterminations qui ont accompagné les points de transformation et la micrographie dans le travail de M. Shepherd il faut ajouter la coloration, qui offre une relation très nette avec la constitution. Voici les résultats obtenus :

COMPOSITION EN Cu 0/0	CONSTITUTION DE L'ALLIAGE	COULEUR DU MÉTAL LIMÉ	COULEUR DE LA CASSURE
100 à 63	α	Allant du rouge au jaune	Jaune
63 à 54	$\beta + \alpha$	Jaune rougeâtre au fond jaune	Jaune or
54 à 51	β	Jaune rougeâtre	Rouge jaunâtre
51 à 43	$\beta + \gamma$	Jaune rougeâtre	Rouge jaunâtre
43 à 40	$\gamma + \beta$	Rouge jaunâtre	Argentin avec nuance rosée
40 à 30	γ	Argent	Argent très brillant
30 à 20	$\gamma + \varepsilon + \delta$	Argent gris à gris bleu	Argent gris
20 à 13	ε	Gris bleuté	Gris bleuté
13 à 2,5	$\varepsilon + \eta$	Gris bleuté de plus en plus clair	Zinc
2,5 à 0	η	Zinc	Zinc

En résumé, les conclusions données par M. Shepherd sont les suivantes :

1° Le cuivre et le zinc forment six séries de solutions solides dénommées α, β, γ, δ, ε, η. Les concentrations limites de ces solutions solides ont été déterminées ;

2° On a tracé le diagramme d'équilibre du système ;

3° Il n'y a pas de composés définis entre cuivre et zinc ;

4° On a trouvé un point quadruple qui avait échappé à l'attention de Roberts-Austen ;

5° La couleur rouge des laitons à basse teneur de cuivre a reçu pour la première fois son explication exacte;

6° Une série complète de photomicrographies montre l'effet du traitement à chaud sur les laitons.

Résistance électrique. — L'étude de la résistance électrique des alliages zinc-cuivre montre une variation brusque correspondant à la combinaison Zn^2Cu. De plus, on note dans certains laitons une variation brusque de la résistance électrique lorsqu'on les chauffe. Cette variation a lieu aux environs de 730°.

Propriétés mécaniques. — Les propriétés mécaniques des alliages cuivre-zinc varient d'une façon sensiblement continue. Toutefois, il y a une relation extrêmement intéressante à noter

entre la structure et la possibilité de se travailler à chaud de certains de ces alliages. Nous verrons plus loin que les laitons

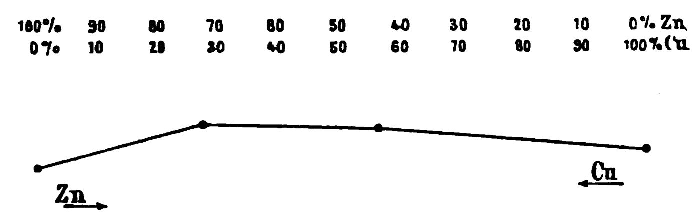


Fig. 164. — Chaleur de formation des alliages cuivre-zinc.

industriels doivent être divisés en deux classes : 1° laitons qui peuvent être travaillés à chaud (laminés, forgés, etc.) ; 2° laitons qui ne peuvent être travaillés qu'à froid. Nous verrons que cette division correspond sensiblement au changement de structure : les laitons qui peuvent se forger à chaud sont

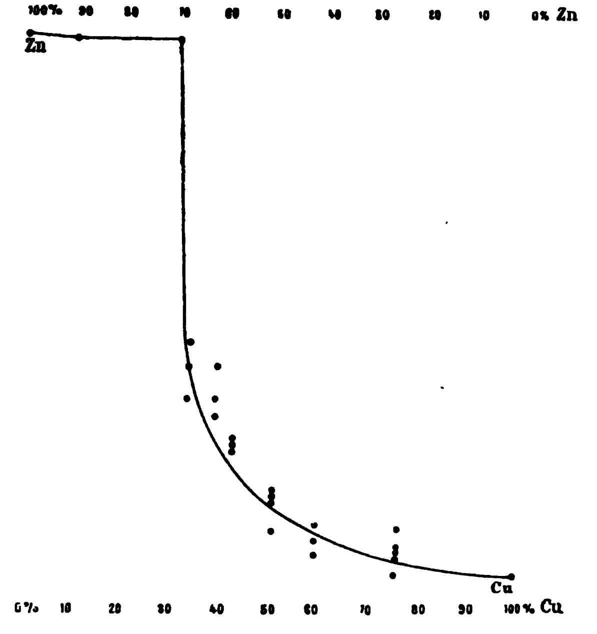


Fig. 165. — Force électromotrice des alliages cuivre-zinc.

formés des cristaux ZnCu (solution β de Shepherd), tandis que ceux qui ne peuvent être travaillés ainsi sont constitués par des polyèdres après recuit. Nous étudierons d'ailleurs en détails les propriétés mécaniques de ces alliages.

Chaleur de formation. — Les expériences de M. Herschkowistch avaient montré que la chaleur de formation de ces alliages passe par un maximum correspondant au composé Zn^2Cu (*fig.* 164).

M. Baker a donné à ce sujet de nouveaux résultats en employant comme dissolvants des mélanges de chlorure d'ammonium avec le chlorure ferrique ou avec le chlorure cuivrique. Il a bien retrouvé le maximum correspondant au composé Zn^2Cu. La formation de cet alliage dégage 52,5 calories-grammes par gramme d'alliage. Un autre maximum, beaucoup moins net, semble exister pour l'alliage ZnCu. La chaleur dégagée dans la formation de ce second alliage serait d'environ 45 calories-grammes par gramme d'alliage.

Les grandeurs des quantités de chaleur sont plus importantes que dans les premières déterminations faites sur ce sujet.

Force électromotrice de dissolution. — M. Herschkowistch a déterminé la force électromotrice de dissolution des alliages zinc-cuivre ; il a trouvé une variation brusque qui correspond au composé Zn^2Cu (*fig.* 165).

II. — ÉTUDE INDUSTRIELLE

FABRICATION

La fabrication du laiton se divise en trois parties :

1° La préparation du métal à l'état fondu;

2° La coulée proprement dite;

3° La transformation du métal ayant pour but de l'amener sous la forme commerciale désirée.

1° Préparation du métal fondu. — Le laiton a d'abord été préparé par le procédé dit *à la calamine*, qui n'est plus du tout usité à l'heure actuelle.

Le principe en était le suivant : on partait d'oxyde de zinc plus ou moins pur obtenu par grillage du minerai; on le plaçait en présence de charbon et de cuivre à température telle qu'il y ait réduction de l'oxyde par le charbon et qu'il se produise des vapeurs de zinc qui agissent sur le cuivre, celui-ci n'étant pas à l'état liquide. On procédait de la façon suivante :

Des creusets en argile réfractaire recevaient le minerai calciné et purifié par lavage, le charbon et le cuivre en grains; le tout était disposé dans une chambre circulaire en briques; l'intervalle entre les creusets était rempli de combustible. A la fin de l'opération, on retirait chaque pot, on agitait avec soin, et on enlevait toute la scorie qui surnageait.

Il est inutile de faire remarquer les inconvénients d'un tel procédé, qui ne saurait donner ni un alliage pur, ni un alliage de composition constante.

Aussi cette méthode a-t-elle été complètement abandonnée et remplacée par la méthode dite *directe*, qui consiste à fondre les deux métaux cuivre et zinc. A vrai dire, on part rarement de métaux purs; généralement on utilise des déchets, du moins en partie.

Le laiton de décolletage ordinaire qui, comme nous le verrons, est à 60 0/0 de cuivre et 40 0/0 de zinc, est obtenu en partant de tournures. (On admet généralement que, lorsqu'on utilise un barreau de laiton, il en tombe 65 0/0). Ces tournures sont préalablement passées à la machine à aimanter. Ce traitement a une importance considérable; car il permet d'éliminer le fer que ne dissout pas l'alliage et vient former dans qui le barreau un corps dur d'autant plus à redouter que la vitesse avec laquelle on travaille généralement le laiton est très grande et que la rencontre d'un morceau de fer ou d'acier est suffisante pour émousser l'outil, voire même le briser. Souvent à ces tournures on mélange des alliages plus riches en cuivre ou susceptibles de donner à la fusion moins de perte que les tour-

nures; ce sont généralement des déchets de planches, des douilles de cartouches, des tubes de chaudière hors d'usage, etc., etc... On utilise parfois des objets en laiton hors d'usage qui sont englobés sous le nom générique de *Mannheim* (c'est dans cette ville que s'est, paraît-il, localisé pendant lontemps le commerce de ces objets détériorés).

Le zinc étant un métal très volatil et très oxydable, les pertes pendant la fusion sont importantes. Elles varient évidemment avec le four, le tirage de la cheminée, la forme de la matière première (les tournures très divisées donnent des pertes quelquefois considérables). On a soin de recouvrir le métal fondu de charbon de bois qui diminue les chances d'oxydation. Dans un certain nombre d'usines, on jette même à la surface du bain du borax qui constitue certainement un protecteur plus énergique.

Pour obtenir la fusion directe du métal, deux méthodes sont usitées :

1° *Le four à creusets;*

2° *Le four à réverbère.*

Comme four à creusets, on emploie généralement le four potager que nous avons décrit au début de cette étude.

Dans quelques usines, on a adopté les fours chauffés au gaz (celui-ci est produit dans un gazogène situé à proximité du four) ou quelques-uns des fours spéciaux décrits au début.

Les creusets employés sont généralement en plombagine ; cependant, pour certains alliages fins, comme les laitons à cartouche, on préfère souvent les creusets en terre réfractaire. Il en est de même pour le cuivre pur.

Le four à réverbère, qui est adopté pour la production en grandes quantités, est généralement de dimensions telles qu'il peut produire deux à trois tonnes de métal. Pour utiliser ce four, on fond tout d'abord le cuivre, en ayant soin d'avoir des flammes qui éliminent la plus grande partie de l'air contenu dans le four; on chauffe, d'autre part, le zinc et les résidus que l'on veut ajouter; quand ils sont à température convenable, on les introduit rapidement dans le bain de cuivre.

2° Coulée proprement dite. — La coulée diffère essentiellement suivant le but que l'on se propose :

1° Si l'on veut obtenir des pièces moulées, on coule en sable, comme nous l'avons expliqué au chapitre 1er ;

2° Si le laiton est destiné à fournir des barres rondes, hexagonales, carrées, etc., des profilés quelconques, des fils, on coule le laiton dans des lingotières métalliques (fonte ou acier), dont la forme est différente suivant que le laminage qui doit suivre a lieu à froid ou à chaud. Nous étudierons plus loin dans quelles conditions on peut opérer d'une façon ou de l'autre.

Lorsque le barreau est destiné à subir le laminage à froid, il est coulé dans des lingotières qui ont une grande hauteur. Chaque lingotière comporte plusieurs cavités ; généralement les diamètres de chacune des cavités sont différents, afin d'obtenir finalement et avec un nombre restreint de passes au laminage des barres de diamètres divers. En résumé, les barres destinées au laminage à froid sont déjà longues ; on a en quelque sorte préparé le travail.

Au contraire, lorsque le métal doit être laminé à chaud, il est coulé en cylindres qui ont un diamètre relativement élevé par rapport à la hauteur et un poids d'environ 30kg,00.

Toutes les lingotières sont faites en deux parties que l'on peut rapprocher ou serrer au moyen de colliers, de frettes et de coins.

Le système de serrage est tel que l'on peut aisément l'ouvrir après la coulée et saisir les barres pour les enlever.

Les lingotières sont enduites d'une matière grasse dans le but d'empêcher le métal d'adhérer à la lingotière.

Un point des plus importants pour la beauté du produit fini est assurément la netteté de la paroi de la lingotière. Dès qu'un défaut s'y produit, il se renouvelle forcément sur le lingot initial et subsiste souvent jusqu'à la fin du traitement. Il est donc nécessaire que les lingotières soient bien entretenues et rabotées de temps à autre.

La température de coulée a, comme pour tous les alliages, une très grande importance : si l'on coule trop chaud, on a un

métal poreux, soufflé ; si l'on coule trop bas, on a un produit qui n'est pas homogène.

Au moment de la coulée, on place au-dessus de la lingotière une espèce d'entonnoir percé de petits trous, qui a pour but de bien répartir le métal dans la lingotière en coopérant à son homogénéité et d'arrêter les matières non dissoutes.

La coulée faite, on laisse refroidir quelques instants ; puis on vient séparer la masselotte, le métal étant encore pâteux ; ensuite on enlève colliers et coins qui retiennent les deux parties de la lingotière ; on ouvre celle-ci et on enlève les barreaux.

Lorsqu'on examine le barreau coulé, on y trouve une poche de retassure très nette.

3° Si le métal est destiné à faire des planches, on coule des plaques de dimensions variables suivant les finales à obtenir.

Nous verrons que dans certains cas on peut partir du même point pour arriver au fil.

Les lingotières sont métalliques[1]. Généralement l'épaisseur des plaques obtenues est de 16 à 22 millimètres ; leur largeur est ordinairement 90, 100, 110, 150, 180, 200, 230, 250 ou 310, et leur longueur de 450 à 700.

Lorsqu'on doit ensuite traiter les planches, comme nous le verrons, en vue du tréfilage, on prépare des plaques de 38 millimètres d'épaisseur, 89 de largeur et 2 mètres à 2^m,50 de longueur.

Tout ce que nous avons dit au point de vue de la coulée, de la préparation de la lingotière, pour les barres de laiton, s'applique à la préparation des planches.

Aussitôt après le laminage, le lingot obtenu est soumis à un traitement mécanique qui a pour but de nettoyer sa surface.

3° Traitement mécanique du métal. — Le laiton, nous l'avons dit, peut être utilisé pour obtenir :

1° Des pièces moulées ;

2° Des barres, fils ou profilés ;

3° Des planches.

1. Hiorns signale (*Alliages métalliques*, p. 146, traduction Boudouard) que l'on a utilisé des moules en granit. Cette méthode est abandonnée depuis longtemps.

Dans le cas des pièces moulées une fois la coulée et le démoulage faits, il ne reste plus qu'à nettoyer, ébarber, et, s'il y a lieu, polir les pièces.

Dans le cas des barres, fils ou profilés, les opérations que doivent subir le métal sont :

A. Le laminage ;

B. Le recuit et le décapage, l'étirage et le tréfilage.

Dans le cas des planches ;

A. Le laminage ;

B. Le recuit et le décapage ;

C. Et, s'il y a lieu, un écrouissage final.

Fabrication des barres, fils ou profilés. — A. *Laminage*[1]. — Seuls parmi les alliages de cuivre et de zinc peuvent être laminés ceux renfermant plus de 54 0/0 de cuivre.

Au point de vue laminage, les laitons se divisent en deux groupes très nets, et l'on peut justement s'étonner de ne pas trouver dans la plupart des ouvrages qui traitent de la fabrication du laiton cette classification cependant très précise :

1° Tous les laitons renfermant plus de 58 0/0 de cuivre peuvent se laminer à froid ;

2° Les laitons renfermant de 55 0/0 à 62 0/0 de cuivre peuvent, seuls, être laminés à chaud[2].

Il est donc nécessaire d'examiner séparément ces deux opérations ; nous avons déjà vu que la préparation du lingot est généralement différente, suivant que l'on doit le laminer à froid ou à chaud.

La suite des opérations est non moins différente.

α) *Laminage à froid*. — Le laminage à froid se fait entre deux cylindres cannelés en procédant par une passe à plat suivie d'une passe à rond. Après ces deux opérations, le

1. Il est bien entendu, nous le répétons, que nous ne parlons ici que des alliages cuivre-zinc ; nous verrons dans le chapitre suivant (*laitons spéciaux*) que certains éléments peuvent se substituer au cuivre et au zinc et permettre de laminer des alliages autres que ceux indiqués ici.

2. Il est à noter, cependant, que les laitons très riches en cuivre (au moins 88 0/0) peuvent être laminés à chaud. Mais il ne faut pas que le travail soit trop brusque, que la passe soit trop importante, pour que l'opération réussisse.

métal doit subir un recuit avant d'être laminé à nouveau.

On voit que l'opération du laminage à froid nécessite des recuits extrêmement fréquents; ce qui augmente considérablement le prix de revient.

β) *Laminage à chaud.* — Le laminage à chaud comprend deux opérations : le dégrossissage et le finissage. Ces deux opérations se réduisent au dégrossissage dans le cas de gros diamètres.

Le lingot brut est réchauffé, puis passé au train dégrossisseur.

Ce train est monté souvent en trio.

Puis la barre dégrossie est portée dans un second four à réchauffer et est passée ensuite au train finisseur.

Celui-ci permet de descendre jusqu'à un diamètre de 8 à 9 millimètres.

On voit que le laminage à chaud est beaucoup plus rapide que le laminage à froid, qu'il nécessite une main-d'œuvre moins grande à la tonne de métal, qu'il ne demande qu'un seul réchauffage intermédiaire pour atteindre le diamètre de 8 à 9 millimètres.

Le laminage à chaud présente donc de grands avantages; mais il ne peut s'appliquer qu'à une catégorie de laitons très particulière, et seules peuvent l'employer les usines qui font le laiton en grandes quantités. De plus, il exige un titre assez bien défini.

B. *Étirage, tréfilage, recuit, décapage.* — Si nous suivons une barre dans ses transformations et si nous la prenons au sortir du laminage, que celui-ci ait lieu à froid ou à chaud, elle doit subir les opérations suivantes :

1° Un recuit ayant pour but de détruire tout ou partie de l'écrouissage; généralement on recuit complètement ce métal.

2° Un décapage ayant pour but d'enlever la couche d'oxyde, sulfure, etc., qui a pris naissance dans le recuit, surtout dans les fours à chauffage direct ;

3° Un étirage ayant pour but d'enlever les défauts superficiels du laminage, de donner une surface brillante et bien dressée. L'étirage peut être fait en une ou plusieurs passes.

Nous décrirons rapidement ces différentes opérations.

Recuit. — Le recuit du laiton doit avoir lieu à une température de 550 à 600°[1]; porté à plus basse température, le laiton garde son état d'écrouissage. Chauffé à trop haute température, le laiton est brûlé ; on sait déjà ce qu'il faut entendre par cette expression. Nous verrons plus loin les conclusions auxquelles a été conduit M. Charpy dans sa très intéressante étude sur ces alliages.

Les fours utilisés pour le recuit du laiton sont de deux sortes :

Les fours à flamme directe, dans lesquels les produits de la combustion sont en contact immédiat avec le métal;

Les fours à cornue, dans lesquels les produits sont placés dans des cornues en terre ou en métal et se trouvent ainsi à l'abri des gaz de la combustion. Les premiers sont de beaucoup les plus répandus; généralement ils affectent la forme d'un long conduit à droite et à gauche duquel sont les carneaux d'amenée des gaz chauds et au-dessous duquel se trouvent les conduits de sortie des gaz brûlés. Le métal à traiter est généralement placé sur des wagonnets, qui entrent avec leur charge par une extrémité du four et sortent à l'autre extrémité; le mouvement est donné par l'intermédiaire de treuils.

Les fours à cornue ne sont usités que pour des fabrications délicates. Ils sont d'un prix très élevé, surtout ceux dont les cornues sont en terre. Les autres, à cornues en métal, ont l'inconvénient de laisser filtrer les gaz de la combustion à travers les parois. Il est bien entendu que, dans l'un et l'autre cas, on peut utiliser la combustion directe du charbon ou le chauffage par gazogène.

Le chauffage au bois est presque complètement abandonné à l'heure actuelle.

Décapage. — Cette opération a pour but d'enlever la couche d'impuretés, notamment d'oxydes, amenée par le recuit ou

1. Voir, à ce sujet, la note de M. Lewis à la Réunion de Nottingham (17 décembre 1902) de la Société Anglaise de l'Industrie Chimique.

même le laminage. Elle consiste essentiellement à plonger le métal dans une dissolution d'acide sulfurique marquant encore 5° B. et de laver ensuite la barre à l'eau.

Les bacs de décapage sont simplement formés de bacs en bois doublés de plomb. A côté de chaque cuve de décapage se trouve généralement une cuve de lavage où coule de l'eau. Évidemment, lorsque le bain de décapage est saturé, on cherche à en récupérer le cuivre. A cet effet, deux moyens sont généralement usités : la concentration ou la cristallisation de ces eaux, afin d'obtenir des cristaux de sulfate de cuivre, qui, par suite du sulfate de zinc contenu, doivent être purifiés par dissolution et cristallisation successives, ou l'évaporation de ces eaux, de façon à avoir des boues qui sont vendues aux usines à cuivre.

Étirage et tréfilage. — Nous avons donné, au début de ce livre, les principes de l'étirage et du tréfilage. Nous n'avons rien de bien particulier à y ajouter, si ce n'est que les passes d'étirage se font généralement par 2 millimètres et que la fabrication du fil s'obtient d'ordinaire par passes de 15 dixièmes de millimètre jusqu'au diamètre de 10 millimètres, par passe de 1 millimètre jusqu'au diamètre de 5 millimètres, par passe de 5/10 jusqu'au diamètre de 1 millimètre. Au-dessous, l'importance des passes dépend de la qualité du fil[1].

Autre méthode pour la fabrication du fil. — Cette méthode consiste essentiellement à découper dans les planches des bandelettes que l'on tréfile ultérieurement.

On part donc ici de plaques qu'on lamine, comme nous le dirons tout à l'heure pour les planches. Puis le métal est découpé en bandes, et celles-ci en baguettes au moyen de plusieurs disques en acier formant une machine à cisailler rotative.

Parfois on utilise une scie qui permet de découper en hélice et d'obtenir ainsi une bande continue que l'on tréfile. Ce procédé, répandu en Allemagne et dans quelques usines fran-

1. A signaler l'existence de machines américaines permettant de diminuer beaucoup la main-d'œuvre du tréfilage.

çaises, est usité aussi pour la fabrication des fils de maillechort[1].

Profilés. — Les profilés sont généralement obtenus par étirage au banc, soit à travers une filière ou une succession de filières convenables, soit simultanément par étirage et par décolletage pratiqué au moyen d'un outil placé sur le banc même à étirer.

Procédé Dick. — Ce procédé, qui n'a pas eu tout le succès que l'on pourrait croire, a pour but de supprimer le laminage et l'étirage et de le remplacer par une compression à *chaud* à travers une matrice.

Voici, d'ailleurs, le principe du procédé, tel qu'il a été exposé par M. Trébla dans *le Génie civil*, en 1897 : il consiste à refouler au travers d'une matrice située à l'extrémité d'un cylindre le métal à travailler, placé dans ce même cylindre, après l'avoir amené, au moyen d'une chauffe préalable, à l'état plastique nécessaire pour faciliter son passage dans la matrice.

Il y a déjà longtemps que le principe de la compression est appliqué à la fabrication des tuyaux en plomb; mais, dans ce dernier cas, le métal est travaillé à une température relativement basse, tandis que, dans le cas actuel, la masse métallique à comprimer doit se trouver à une température très élevée, comprise entre 400 et 500°, suivant la nature du métal ou de l'alliage employé.

Par suite de cette obligation de pouvoir faire supporter, en même temps, au cylindre compresseur une très forte pression et une haute température, la mise en pratique du nouveau procédé n'est pas sans présenter de nombreuses difficultés. En effet, la résistance de l'acier à 500° est assez faible.

Aussi, dans tous les essais tentés avec des cylindres ordinaires en fonte ou en acier de différentes qualités, entourés d'une chambre annulaire chauffée par un feu de coke destiné à maintenir le métal à l'état plastique pendant toute la durée de

1. On désigne souvent cette opération sous le nom d'escargotage.

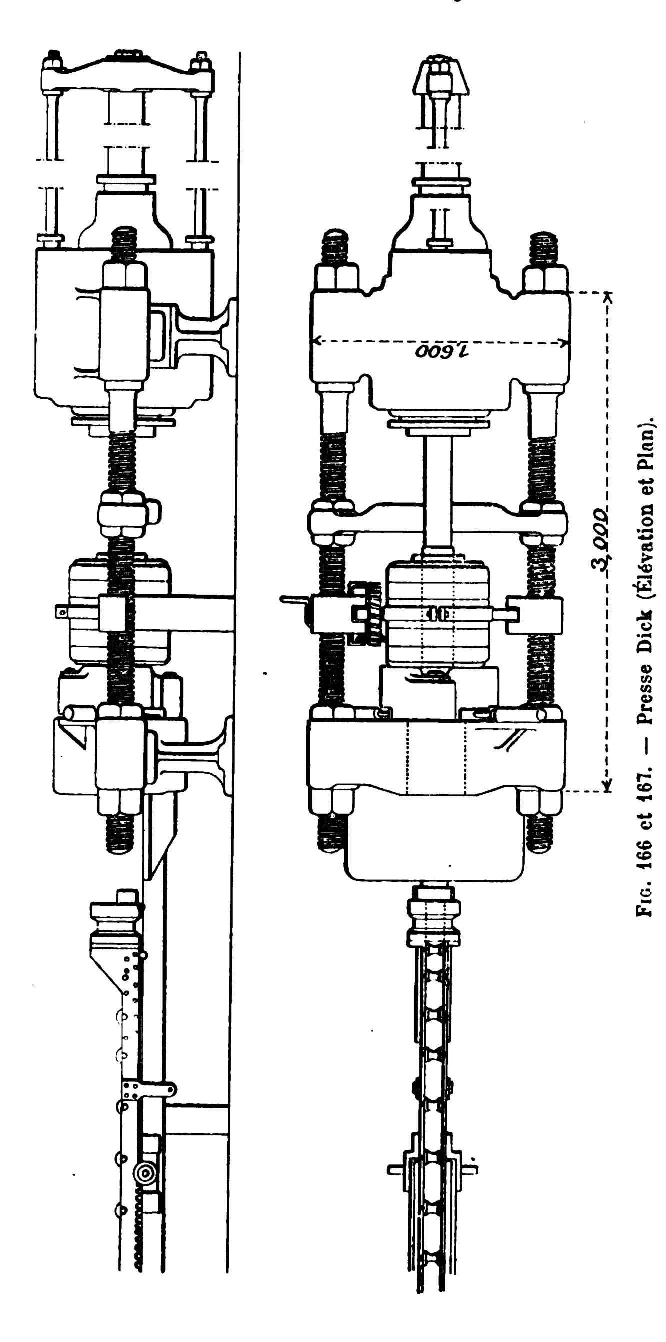


Fig. 166 et 167. — Presse Dick (Élévation et Plan).

l'opération, la chambre cylindrique prenait-elle rapidement une forme renflée et il s'y produisait des fissures longitudinales par lesquelles s'échappait le métal comprimé.

En présence de l'insuccès de ces premiers essais, l'inventeur s'est trouvé amené à étudier un dispositif spécial, qui remplit exactement les conditions de résistance cherchées, et nous allons en donner la description.

La chambre de compression imaginée par M. Dick se compose d'un premier cylindre ou tube intérieur en acier, entouré successivement d'une série d'autres cylindres également en acier, mais séparés les uns des autres par une matière isolante et en même temps très résistante. Par suite de ce mode de construction le cylindre intérieur, qui est soumis à l'action de la haute température du métal plastique qu'il renferme, est renforcé par les autres cylindres concentriques qui jouent, dans ce cas, le rôle de frettes et qui, se trouvant à des températures d'autant plus voisines de la température ordinaire qu'ils sont plus près de la périphérie, conservent, par conséquent, une résistance beaucoup plus grande. Il suffit donc, pour assurer une marche régulière à l'appareil, de calculer les dimensions de la dernière des frettes d'après les efforts qu'elle peut avoir à supporter du fait de la compression, en tenant compte de son coefficient de résistance à la température à laquelle elle se trouve portée pendant la période de travail.

Les matrices employées sont fabriquées en acier extra-dur; elles comportent, suivant la section des barres que l'on veut obtenir, une ou plusieurs ouvertures. Dans ce dernier cas, une même matrice peut fournir dans une seule opération plusieurs barres de différentes sections. La matrice avec laquelle on doit opérer est placée dans une cavité conique pratiquée dans un support qui, pendant le travail, est solidement maintenu en place au moyen d'une paire de mâchoires à griffes actionnées par la presse hydraulique; ce support ainsi que les mâchoires sont fixés dans un sommier très robuste également en acier.

On doit, avant chaque opération, chauffer préalablement la matrice et son support de façon qu'il ne se produise pendant le travail aucune dilatation dans le profil de la matrice.

Du reste, cette dernière, ainsi que son support, ne sont fixés au cylindre de compression que lorsque ce dernier a été rempli de métal ; aussi, pour obturer le fond du cylindre pendant le chargement du métal, on emploie une plaque de fermeture, ou obturateur, en acier, maintenue à l'aide de crochets.

La capacité des récipients varie suivant les types d'appareils ; ils peuvent contenir de 50 à 200 kilogrammes de métal et sont montés sur pivot, de façon à pouvoir prendre, au moyen d'un engrenage à vis, la position horizontale ou verticale.

Les figures 166 et 167 montrent la disposition d'ensemble d'un appareil Dick travaillant à $3^{kg},500$ par millimètre carré et dont le corps de presse a $0^{m},500$ de diamètre.

Mode de travail. — On ferme tout d'abord l'extrémité du cylindre au moyen de la plaque obturatrice ; puis, on l'amène dans la position verticale, et l'on y verse directement le métal à travailler, lequel se trouve contenu à l'état liquide dans un creuset ; on attend ensuite quelques minutes pour laisser refroidir un peu la masse métallique et lui faire prendre l'état plastique.

On place alors sur la charge un disque d'arrêt en acier biseauté destiné à empêcher que le métal ne reflue en arrière sous l'action de la pression ; car le piston proprement dit possède un diamètre inférieur à celui du corps de presse, de façon à éviter le refroidissement par contact de ce dernier pendant l'opération. On interpose ensuite, entre le disque d'arrêt et le piston, un bloc libre d'acier dont une des faces présente une cavité dans laquelle vient se loger l'extrémité du piston. Sous les actions combinées de la pression et de la chaleur, le disque d'arrêt se dilate et ferme exactement l'âme du récipient.

Ce dernier est ensuite ramené dans la position horizontale,

la plaque obturatrice est enlevée, et on loge la matrice dans son support que l'on fixe au moyen des mâchoires hydrauliques. Il ne reste plus qu'à actionner la pompe pour transformer en quatre minutes le contenu du récipient en barres affectant comme profil celui des matrices au travers desquelles passe le métal; ces barres viennent reposer sur un banc à rouleau faisant suite à l'appareil.

L'opération achevée, on ouvre les mâchoires pour dégager le support, ainsi que la matrice qu'il renferme; on continue à faire avancer le piston de façon que, dans sa marche en avant, il expulse le métal restant qui constitue le déchet de l'opération, et que la matrice, son support, le disque d'arrêt et le bloc libre soient chassés également en dehors du récipient.

On peut aussi, au moment du chargement de l'appareil, verser dans le corps de presse, non plus du métal en fusion, ainsi que nous l'avons indiqué plus haut, mais des lingots préalablement chauffés jusqu'au degré de plasticité voulu, ces lingots ayant des dimensions correspondant à celles de l'intérieur du récipient. Dans la pratique, on arrive, paraît-il, à traiter facilement cinquante charges et plus par jour, ce qui, en supposant que chacune d'elles pèse 100 kilogrammes, représente une production journalière de 5 tonnes.

« Des essais intéressants ont été faits, dit M. Trébla, à ce sujet dans les ateliers des établissements Cail, par les soins du bureau Véritas, sur différents échantillons de barres en laiton, en bronze d'aluminium ou en métal Delta; ces divers métaux sont ceux auxquels s'applique le plus facilement ce procédé. Le tableau comparatif suivant, qui résume ces expériences sur les barres produites par le nouveau procédé, permet de se rendre compte des avantages que peuvent présenter celles de même métal ou alliage obtenues par laminage.

	BARRES LAMINÉES		BARRES SYSTÈME DICK	
	RÉSISTANCE à la traction en kil. par millim. carré	ALLONGEMENT 0/0	RÉSISTANCE à la traction en kil. par millim. carré	ALLONGEMENT 0/0
Laiton (Métal Muntz)....	54,6	18,5	50,5	25 »
Bronze d'aluminium...	55 »	6 [1]	65,3	25,0
Métal Delta..	73,3	28,8	76,6	29,8

La supériorité des barres obtenues par le système Dick se rouve encore augmentée par ce fait que leur surface est parfaitement lisse, ce qui dispense de tout travail de finissage ultérieur.

« Actuellement l'application de ce procédé se trouve presque exclusivement limitée au traitement de bronzes forgeables, tels que le métal Delta, les bronzes d'aluminium et l'aluminium lui-même, certains laitons, le métal Muntz, etc.; mais il n'est pas impossible, ajoutait M. Tréba, que, grâce à l'emploi d'un nouvel acier spécial pour la confection des matrices, on ne puisse arriver à utiliser ce même procédé pour la fabrication de profilés en fer ou en acier et, d'une manière générale, en métaux moins ductiles et moins malléables que ceux auxquels le système s'applique actuellement[2].

« L'appareil que nous venons de décrire permet d'obtenir tous les profilés possibles, depuis les fils pesant 15 grammes par mètre courant jusqu'aux barres pesant 60 kilogrammes et plus par mètre courant. Le service de la machine exige trois hommes seulement; ce nombre doit être porté à quatre si l'on se sert du four à réchauffer, un des hommes étant spécialement affecté au service de ce dernier.

1. Tout cet exposé est extrait de l'article de M. Trébla.

2. Ce chiffre donné par M. Trébla se rapporte assurément à un alliage défectueux. Il est regrettable d'ailleurs qu'on n'ait pas l'analyse des échantillons essayés.

« Le prix de fabrication des profilés métalliques semblait pouvoir, avec ce nouveau procédé, être réduit dans de notables proportions, car le procédé ordinaire par laminage exige non seulement une force sensiblement plus grande, mais nécessite, en outre, des installations coûteuses, ainsi qu'une grosse dépense de main-d'œuvre, sans compter les réchauffages multiples que demande l'exécution des pièces de faibles sections.

« Il y a lieu aussi de remarquer que, sous l'influence de la forte pression exercée par ce nouveau mode de fabrication sur le métal mis en œuvre, ce dernier devient très homogène et doit acquérir des propriétés de résistance et d'allongement notablement supérieures à celles des barres de même métal fabriquées par le procédé ordinaire de laminage. »

Nous croyons pouvoir ajouter que le procédé Dick présente le grave inconvénient de détériorer rapidement les filières, de donner souvent des alliages hétérogènes et qu'il ne s'est pas aussi généralisé que l'espérait l'auteur de l'étude que nous venons de citer.

Autre procédé. — Un autre procédé, qui s'applique à la confection des tubes, barres, profilés et fils, paraît devoir amener dans cette partie de l'industrie du laiton un progrès considérable. Il est toutefois trop nouveau pour que nous puissions en donner les résultats, et il ne nous est pas possible d'en indiquer à l'heure actuelle le principe. Disons seulement qu'il s'agit d'une compression à froid à travers une filière de forme spéciale. — Une superbe exposition de tubes obtenus par ce procédé existait à Liège.

Des défauts des laitons en barres, fils ou profilés. — Les principaux défauts que présente le laiton en barres, fils, profilés sont :

1° L'hétérogénéité et la soufflure;
2° Les pailles ou défauts superficiels;
3° La présence de morceaux de fer, nickel, etc.;
4° La dureté trop grande ;
5° Le manque de dressage.

L'hétérogénéité et la soufflure sont des défauts de fonderie, qui peuvent provenir du mélange et de la poche de retassure ; d'ailleurs on ne saurait trop rappeler l'importance capitale de cette partie de la fabrication.

Les pailles ou défauts superficiels peuvent avoir trois causes :

La présence de petites parcelles de fer;

Le défaut superficiel des lingotières ;

Le mauvais laminage (la *pinçure*, suivant le terme de métier).

On évite la première cause par l'aimantation des tournures, la seconde en rabotant les lingotières dès qu'elles présentent un défaut ; quant à la troisième, c'est un défaut de main-d'œuvre et de réglage d'appareil que le bon ouvrier évite aisément ou de cannelures mal rectifiées.

La dureté trop grande est due à un excès d'écrouissage, à un manque de recuit, à l'intervention de produits étrangers qui se trouvent souvent dans des déchets (tournures et autres), tels que aluminium, étain, etc. Le rôle de ces différents corps sera analysé dans le chapitre suivant.

Enfin le manque de dressage provient soit des déformations produites pendant le recuit, soit du mauvais étirage.

Le mauvais étirage provient souvent de ce que le chemin de roulement sur lequel se déplace l'appareil tracteur n'est pas toujours parfaitement rectiligne.

On pare à cet inconvénient en utilisant des machines à dresser automatiques qui ont un très grand débit.

Fabrication des planches. — Nous avons déjà étudié la coulée des lingots plats en vue de la fabrication des planches.

Le travail mécanique, que doit subir le métal pour être amené sous sa forme définitive, comprend deux parties :

1° Le laminage ;

2° Le recuit ;

3° Le décapage.

Le laminage se fait entre deux cylindres lisses.

Chaque laminage est suivi d'un recuit qui a lieu dans les mêmes conditions que pour les barres.

Cependant on utilise généralement des fours, qui, autant que possible, n'entraînent pas l'oxydation du métal.

Quant au décapage, il se fait comme il a été déjà indiqué.

Les planches de laiton sont livrées à l'industrie sous deux états : à l'état recuit ou à l'état écroui.

A l'état recuit, le métal est doux, il se travaille aisément ; pour l'obtenir sous cette forme, la dernière opération est un recuit suivi de décapage.

A l'état écroui, il est dur, élastique.

Pour produire cet état du métal, on lui fait subir, après un dernier recuit, deux ou trois passes assez fortes de laminage.

L'industrie emploie aussi un métal en feuilles extrêmement minces, vendu souvent sous le nom de *métal hollandais*. Pour obtenir le laiton sous une aussi faible épaisseur, il faut faire intervenir et le laminage et le martelage.

Ayant obtenu par laminage une feuille déjà très mince, on la coupe en morceaux ayant une surface de 25 millimètres carrés ; on place ces morceaux les uns sur les autres, séparés seulement par une feuille de papier et on les martèle énergiquement jusqu'au moment où la surface est devenue environ 16 fois plus grande. On découpe à nouveau les feuilles ainsi obtenues, on les recuit, on les empile à nouveau, on les martèle et on recommence ainsi l'opération jusqu'à ce que l'on obtienne l'épaisseur voulue.

PROPRIÉTÉS DES ALLIAGES CUIVRE-ZINC

Si les laitons ou, mieux, les alliages de cuivre et de zinc sont si précieux à l'industrie, ils le doivent aux propriétés suivantes :

Prix beaucoup moins élevé que celui du cuivre ;

Dureté plus élevée que celle du cuivre; donc résistance plus forte à l'usure;

Propriétés mécaniques meilleures que celles du cuivre pour un grand nombre d'emplois;

Grande malléabilité; ils sont donc propres à être transformés en barres, profils, planches, feuilles minces, fils; à être estampés, emboutis, etc.;

Points de fusion moins élevés que celui du cuivre; ils se prêtent donc mieux que ce métal aux moulages fins;

Grande facilité de travail : ils *bourrent* moins l'outil que le cuivre et sont donc plus faciles à travailler;

Résistance plus grande que le cuivre aux agents atmosphériques;

Très jolie couleur après polissage.

Il faut ajouter que les laitons ne présentent pas certaines qualités qui leur font préférer les bronzes, bien que ces alliages soient d'un prix beaucoup plus élevé. Ils ne sont pas assez résistants au frottement, d'une part, et, d'un autre côté, ils ne possèdent pas cette sonorité, très précieuse dans certains bronzes.

Les propriétés des alliages cuivre-zinc ont été étudiées par un très grand nombre d'industriels et de savants. Mais il ne faut pas oublier qu'avant les recherches de M. Charpy les résultats étaient extrêmement confus.

Nous croyons cependant nécessaire de rappeler les principaux résultats obtenus.

Disons de suite que les alliages renfermant moins de 10 0/0 de zinc sont rouges; puis, ils deviennent or, puis jaune verdâtre; vers 40 0/0 de zinc, ils sont à nouveau franchement or, et cette coloration s'accentue quand le zinc augmente pour devenir absolument rouge vers 40 à 45 0/0. Au-dessous de 45 0/0, ils sont blancs.

Pour résumer les études antérieures à celles de M. Charpy, nous reproduirons ici le tableau donné par Thurston sur les recherches antérieures aux siennes; dans un second tableau nous donnerons les résultats obtenus par ce savant et qui ont

été publiés dans son remarquable ouvrage : *A Treatise on Brasses, Bronzes and other Alloys* (New York, Wiley and Sons, 1893).

Voici, d'abord, les indications bibliographiques nécessaires pour comprendre le premier tableau :

Bolley, *Essais et recherches chimiques.* Paris, 1869, indiqué dans le tableau par l'abréviation Bo.

Crookenwitt, *Erd'manns Journal*, XLV, 1848. Indiqué dans le tableau par l'abréviation Cr.

Calvert et Johnson, *Philosophical Magazine*, 1850, 1858, 1859. Indiqué dans le tableau par l'abréviation CJ.

Matthiessen, *Philosophical Transactions*, 1860, 1864. Indiqué dans le tableau par l'abréviation Ma.

Mallet, *Philosophical Magazine*, 1842. Indiqué dans le tableau par l'abréviation Ml.

Riche, *Annales de Chimie et de Physique*, 1873. Indiqué dans le tableau par l'abréviation Ri.

Rapport du Comité des Alliages métalliques du United States Board. Indiqué dans le tableau par l'abréviation USB.

Wiedermann, *Poggendorff's Annalen*, 1859. Indiqué dans le tableau par l'abréviation We.

FORMULE ATOMIQUE	COMPOSITION du mélange primitif Cu	Zn	COMPOSITION par analyse Cu	Zn	POIDS SPÉCIFIQUE	COULEUR	CASSURE	TÉNACITÉ	ORDRE de ductilité MALLET
	100	0	»	»	8.874	rouge	fibreuse	19.571	»
	100	0	»	»	8.667	rouge brique	terreuse	38.793	8
	100	0	»	»	8.921			»	»
	100	0	»	»	»			»	»
	100	0	»	»	8.952			»	»
	100	0	»	»	»			»	»
	100	0	»	»	8.672			17.073	»
	99,15	0,85	»	»	»			»	»
	97,80	2,20	»	»	»			»	»
	97,50	2,50	97,83	1,88	8.791	jaune rouge	vésiculaire	19.177	»
	97,20	2,50	»	»	»			»	»
	95	5	96,07	3,79	8.825	id.	id.	8.096	»
	93,6	6,4	»	»	»			»	»
	92,5	7,5	92,32	7,68	8.746	id.	id.	»	»
	92,5	7,5	»	»	»			»	»
	92	8	»	»	»			»	»
	91	9	»	»	»			»	»
$Cu_{10}Zn$	90,72	9,28	»	»	»	rouge jaune	grossièrement cristalline	19.081	6
$Cu_{10}Zn$	90,65	9,35	»	9,60	8.605			»	»
	90	10	90,56	9,42	8.834	jaune rouge	vésiculaire	»	»
	90	10	»	»	8.773			»	»
Cu_9Zn	89,80	10,20	»	»	8.607	rouge jaune	finement cristalline	18.135	4
	88,89	11,11	»	»	»			»	»
Cu_8Zn	88,60	11,40	»	»	8.633	id.	id.	20.185	2
	87,50	12,50	88,94	10,97	»	jaune rouge	vésiculaire	»	»
Cu_7Zn	87,30	12,70	»	»	8.587		finement cristalline	20.816	9
	86,67	13,33	»	»	»			»	»
	86,38	13,61	»	»	»			»	»
	86	14	»	»	»			»	»
	85,50	14,50	»	»	»			»	»
Cu_6Zn	85,4	14,6	»	»	8.591	jaune rouge	fibreuse	22.235	5
Cu_6Zn	85,31	14,66	»	14,90	8.710			»	»
	85,3	14,7	»	»	»	rouge jaune	terreuse	»	»
	85	15	89,80	10,06	8.656			»	»
	85	15	»	»	»			»	»
	84,6	15,4	»	»	»			»	»
	84,21	15,79	»	»	»			»	»
	83,99	17,1	»	»	»			»	»
Cu_5Zn	83,02	16,98	»	»	8.415	rouge jaune	finement cristalline	21.604	11
Cu_5Zn	82,95	17,05	»	»	8.673			»	»
	82,54	17,46	»	»	»			»	»
	82,5	17,5	82,93	16,98	8.633	id.	terreuse	22.950	»
	82,46	17,54	»	»	»			»	»
	82,3	17,7	»	»	»			»	»

DUCTILITÉ relative THURSTON	DURETÉ CALVERT, MALLET, JOHNSON	ORDRE de malléabilité MALLET	ORDRE de fusibilité MALLET	CONDUCTIBILITÉ POUR LA CHALEUR Ag = 100	CONDUCTIBILITÉ POUR L'ÉLECTRICITÉ Ag = 100	RÉFÉRENCES	REMARQUES
30,8	»	»	»	»	»	USB	
»	22	1	15	»	»	Ml	
»	»	»	»	»	93,16	Ma	
»	30,1	»	»	81,1	»	CJ	
»	»	»	»	»	»	Mar	Tôle de cuivre.
»	»	»	»	73,6	79,3	We	
»	»	»	»	»	»	We	Moyenne de 9 échantillons.
»	»	»	»	»	»	Bo	Tombac pour bouchons.
»	»	»	»	»	»	»	Tombac rouge de Vienne.
118,9	»	»	»	»	»	USB	
»	»	»	»	»	»	Bo	Coussinets, métal poreux.
37,9	»	»	»	»	»	USB	Barre défectueuse.
»	»	»	»	»	»	Bo	Pinchback.
»	»	»	»	»	»	USB	
»	»	»	»	»	»	Bo	Coussinets (Autriche).
»	»	»	»	»	»	Bo	Tombac rouge de Paris.
»	»	»	»	»	»	Bo	Tombac.
»	21	13	14	»	»	Ml	
»	»	»	»	»	»	Ri	Poids spécifique du lingot : 8.753.
169,1	»	»	»	»	»	USB	
»	»	»	»	»	»	Bo	Oreide français.
»	20	11	13	»	»	Ml	
»	»	»	»	27,3	25,5	We	
»	19	10	12	»	»	Ml	
»	»	»	»	»	»	USB	
»	18	9	11	»	»	Ml	
»	»	»	»	29,9	30,9	We	
»	»	»	»	»	»	Bo	Moulages délicats.
»	»	»	»	»	»	Bo	Ornements de Hanovre.
»	»	»	»	»	»	Bo	Oreide français.
»	17	8	10	»	»	Ml	
»	»	»	»	»	»	Ri	Poids spécifique de la poudre : 8.584.
»	»	»	»	»	»	Bo	Joailleries de Paris.
250,1	»	»	»	»	»	USB	
»	»	»	»	»	»	Bo	Tombac d'Oker.
»	»	»	»	»	»	Bo	
»	»	»	»	»	»	Bo	Tombac pour boutons.
»	»	»	»	»	»	Bo	Poudre de bronze.
»	16	2	9	»	»	Ml	Métal de Bath.
»	427,08	»	»	71,5	»	CJ	
»	»	»	»	»	»	Bo	Alliage pour joaillerie.
105,3	»	»	»	»	»	USB	
»	»	»	»	31,1	29,2	We	
»	»	»	»	»	»	Bo	Ornements.

FORMULE ATOMIQUE	COMPOSITION du mélange primitif		COMPOSITION par analyse		POIDS SPÉCIFIQUE	COULEUR	CASSURE	TENACITÉ	ORDRE de ductilité MALLET
	Cu	Zn	Cu	Zn					
	80	20	81,91	17,90	8.598	jaune	id.	22.999	»
Cu_4Zn	79,65	20,35	»	»	»	jaune rouge	finement cristalline	37.261	7
Cu_4Zn	79,56	20,44	»	»	8.650			»	»
Cu_4Zn	79,51	20,49	»	21,80	8.638			»	»
	77,9	22	»	»	»			»	»
	77,5	22,5	79,39	22,45	8.574	jaune	terreuse	25.083	»
	75,7	24,3	»	»	»			»	»
	75	25	76,65	23,08	8.528	id.	id.	21.486	»
	74,62	25,38	»	»	»			»	»
Cu_3Zn	74,58	25,42	»	»	8.397	jaune pâle	finement cristalline	20.658	10
Cu_3Zn	74,48	25,52	»	»	8.576			»	»
	72,73	27,27	»	»	»			»	»
	72,5	27,5	73,20	26,47	8.465	jaune	terreuse	22.232	»
	72	28	»	»	»			»	»
	71,5	28,5	»	»	»			»	»
	70,1	29,9	»	»	»			»	»
	70	30	71,20	28,54	8.444	jaune	id.	21.479	»
	67,74	32,26	»	»	»			»	»
	67,54	32,46	»	»	»			»	»
	67,5	32,5	69,74	30,06	8.384	jaune	id.	19.796	»
	67,2	32,8	»	»	»			»	»
	66,7	33,3	»	»	»			»	»
	66,6	33,4	»	»	»			»	»
Cu_2Zn	66,18	33,82	»	»	8.299	jaune	finement cristalline	19.712	3
Cu_2Zn	66,16	33,84	»	»	8.392			»	»
Cu_2Zn	66,06	33,94	»	»	8.488			»	»
	66	34	»	»	»			»	»
	65,98	34,02	»	34,5	8.410			»	»
	65,4	34,6	»	»	»			»	»
	65,3	34,7	»	»	»			»	»
	65	35	66,27	33,50	8.371	rouge jaune	terreuse	26.611	»
	65	34,76	»	»	»			»	»
	63,5	36,5	»	»	»			»	»
	62,5	37,5	63,44	36,36	8.411	id.	id.	34.003	»
	61,25	38,75	»	»	»			»	»
	60,8	39,2	»	»	»			»	»
	60,16	39,71	»	»	»			»	»
	60	40	60,94	38,65	8.405	id.	id.	28.909	»
	60	40	»	»	»			»	»
	59,5	40,5	»	»	»			»	»
Cu_3Zn_2	59,36	40,64	»	»	8.224			»	»
Cu_3Zn_2	59,26	40,74	»	40,10	8.412			»	»
	58,33	41,77	»	»	»			»	»
	57,5	42,5	58,49	41,10	8.363	id.	id.	35.516	»
	55	45	»	»	»			»	»

DUCTILITÉ relative THURSTON	DURETÉ CALVERT, MALLET, JOHNSON	ORDRE de malléabilité MALLET	ORDRE de fusibilité MALLET	CONDUCTIBILITÉ POUR LA CHALEUR Ag = 100	CONDUCTIBILITÉ POUR L'ÉLECTRICITÉ Ag = 100	RÉFÉRENCES	REMARQUES
113,1	»	»	»	»	»	USB	
»	15	3	8	»	»	Ml	Laiton hollandais.
»	468,75	»	»	66,6	»	CJ	
»	»	»	»	»	»	Ri	Poids spécifique de la poudre : 8.367.
»	»	»	»	»	»	Bo	Feuille d'or de Vienne.
97,5	»	»	»	»	»	USB	
»	»	»	»	»	»	Bo	Métal de Bristol.
76,7	»	»	»	»	»	USB	
»	»	»	»	»	»	Bo	Doublage de navires.
»	14	4	7	»	»	Ml	Laiton laminé en feuilles.
»	468,75	»	»	63,8	»	CJ	
»	»	»	»	»	»	Bo	
88,7	»	»	»	»	»	USB	
»	»	»	»	»	»	Bo	Chrysorine.
»	»	»	»	»	»	Bo	Tombac.
»	»	»	»	»	»	Bo	Forgeable.
77,8	»	»	»	»	»	USB	
»	»	»	»	25,8	25,4	We	
»	»	»	»	»	»	Bo	Laiton forgeable.
49,1	»	»	»	»	»	USB	
»	»	»	»	»	»	Bo	Métal de Bristol.
»	»	»	»	»	»	Bo	Chrysorine.
»	»	»	»	»	»	Bo	Laiton commun.
»	13	6	6	»	»	Ml	
»	»	»	»	»	»	Cr	
»	472,92	»	»	62,1	»	CJ	
»	»	»	»	»	»	Bo	Laiton forgeable.
»	»	»	»	»	»	Ri	Poids spécifique de la poudre : 8,390.
»	»	»	»	»	»	Bo	Bon fil de laiton.
»	»	»	»	»	»	Bo	Or de mosaïque.
72,8	»	»	»	»	»	USB	
»	»	»	»	»	»	Bo	Laiton forgeable.
»	»	»	»	»	»	Bo	id.
60,6	»	»	»	»	»	USB	
»	»	»	»	»	»	Bo	Soudure forte pour laiton.
»	»	»	»	»	»	Bo	Métal de Bristol.
»	»	»	»	»	»	Bo	Laiton forgeable.
49,0	»	»	»	»	»	USB	
»	»	»	»	»	»	»	Métal de Muntz.
»	»	»	»	»	»	Bo	Doublage de navires.
»	»	»	»	»	»	Cr	
»	»	»	»	»	»	Ri	Poids spécifique de la poudre : 8,329.
»	»	»	»	»	»	Bo	Laiton forgeable.
12,1	»	»	»	»	»	USB	
»	»	»	»	»	»	Bo	Métal de Bath.

FORMULE ATOMIQUE	COMPOSITION du mélange primitif Cu	Zn	COMPOSITION par analyse Cu	Zn	POIDS SPÉCIFIQUE	COULEUR	CASSURE	TÉNACITÉ	ORDRE de ductilité MALLET
	55	45	55,15	44,44	8.283			31.173	»
	54,9	45,1	»	»	»			»	»
	54	46	»	»	»			»	»
	52,5	47,5	54,86	44,78	8.301			32.665	»
	50	50	49,66	50,14	8.291			21.817	»
CuZn	49,47	50,53	»	»	8.230	jaune	grossièrement cristalline	14.508	12
CuZn	49,32	50,68	»	»	7.808			»	»
CuZn	49,23	50,76	»	50,30	8.304			»	»
	47,5	52,5	48,95	50,82	8.216	gris rose	grain grossier	18.339	»
	45	55	47,56	52,28	»			17.001	»
	43	57	»	»	»			»	»
	42,5	57,5	43,36	56,22	8.034	id.	grain fin	6.455	»
	40	60	41,30	58,12	8.001	blanc d'arg.	vitreuse conchoïdale	2.623	»
Cu_2Zn^3	39,27	60,73	»	60,35	8.171			»	»
	37,5	62,5	38,36	61,05	7.982	id.	conchoïdale	2.173	»
Cu_3Zn_5	36,88	63,12	»	»	7.939			»	»
	35	65	36,62	62,78	7.974	id.	id.	1.869	»
	33,34	66,66	»	»	»			»	»
$CuZn^2$	32,85	67,15	»	»	»			30.435	1
$CuZn_2$	32,74	67,26	»	»	»			»	»
$CuZn_2$	32,66	67,34	»	64,80	8.048	jaune foncé	grossièrement cristalline	»	»
	32,5	67,5	35,68	63,71	7.966	blanc d'arg.	conchoïdale	1.687	»
Cu_8Zn_{17}	31,52	68,48	»	»	7.721	id.	id.	3.311	0
Cu_8Zn_{18}	30,30	69,70	»	»	7.836	id.	id.	3.469	0
	30	70	32,94	66,23	7.811	id.	id.	1.248	»
Cu_8Zn_{19}	29,17	70,83	»	»	8.019	gris d'arg.	id.	1.103	0
Cu_8Zn_{20}	28,12	71,88	»	»	7.603	gris cendré	id.	5.046	0
	27,5	72,5	29,20	70,17	7.766	gris clair	id.	4.515	»
Cu_8Zn_{21}	27,10	72,9	»	»	8.058	gris d'arg.	id.	1.419	0
Cu_8Zn_{22}	26,24	73,76	»	»	7.882			1.261	0
	25,4	74,6	»	»	»			»	»
Cu_8Zn_{23}	25,39	74,61	»	»	7.443	gris cendré	finement cristalline	9.304	0
	25	75	»	»	7.675	gris bleu	grain fin	6.814	»
$CuZn_3$	24,64	75,36	»	»	7.736			»	»
$CuZn_3$	24,5	75,5	»	»	7.449	gris cendré	finement cristalline	8.042	0
	22,5	77,5	21,82	77,43	7.416	gris bleu	grain fin	4.928	»
	20	80	20,81	77,63	7.418			6.336	»
	20	80	»	»	»			»	»
$CuZn_4$	19,65	80,35	»	»	7.371	gris cendré	finement cristalline	2.996	0
$CuZn_4$	19,57	80,43	»	»	7.445			»	»
$CuZn_4$	19,52	80,48	»	79,30	7.863			»	»

DUCTILITÉ relative THURSTON	DURETÉ CALVERT, MALLET, JOHNSON	ORDRE de malléabilité MALLET	ORDRE de fusibilité MALLET	CONDUCTIBILITÉ POUR LA CHALEUR Ag = 100	CONDUCTIBILITÉ POUR L'ÉLECTRICITÉ Ag = 100	RÉFÉRENCES	REMARQUES
19,5	»	»	»	»	»	USB	
»	»	»	»	»		Bo	Laiton très ductile (Storer).
»	»	»	»	»		Bo	
7,4	»	»	»	»	»	USB	
3,1	»	»	»	»	»	USB	
»	12	5	6	»	»	Ml	Laiton allemand.
»	604,17	»	»	68,8	»	CJ	
»	»	»	»	»	»	Ri	Poids spécifique du lingot : 8,263.
0,36	»	»	»	»	»	USB	
0,26	»	»		»	»	USB	
»	»	»	»	»	»	Bo	Écussons de serrures.
0,02	»	»	»	»	»	USB	
0,01	»	»	»	»	»	USB	
»	»	»	»	»	»	Ri	Poids spécifique du lingot : 8,039.
0,02	»	»	»	»	»	USB	
»	»	»	»	»	»	Cr	
0,006	»	»	»	»	»	USB	
»	»	»	»	»	»	Bo	Soudure forte pour laitons.
»	10	7	6	»	»	Ml	Laiton d'horloger.
»	cassé	»	»	42,8	»	CJ	
»	»	»	»	»	»	Ri	Poids spécifique du lingot : 7,796.
0,11	»	»	»	»	»	USB	
»	5	22	5	»	»	Ml	Très brisant.
»	0	23	5	»	»	Ml	
0,005	»	»	»	»	»	USB	
»	7	21	5	»	»	Ml	Très brisant.
»	3	19	5	»	»	Ml	Brisant.
0,09	»	»	»	»	»	USB	
»	8	18	5	»	»	Ml	Brisant.
»	9	20	5	»	»	Ml	Très brisant.
»	»	»	»	»	»	Bo	Protège le fer de la rouille.
»	1	15	5	»	»	Ml	A peine malléable.
0,002	»	»	»	»	»	USB	
»	cassé	»	»	53,1	»	CJ	
»	2	16	4	»	»	Ml	Brisant.
0,004	»	»	»	»	»	USB	
0,002	»	»	»	»	»	USB	
»	»	»	»	»	»	Bo	Métal pour boutons.
»	4	14	3	»	»	Ml	Métal blanc pour boutons.
»	cassé	»	»	58,9	»	CJ	
»	»	»	»	»	»	Ri	Poids spécifique du lingot : 7,215

FORMULE ATOMIQUE	COMPOSITION du mélange primitif		COMPOSITION par analyse		POIDS SPÉCIFIQUE	COULEUR	CASSURE	TÉNACITÉ	ORDRE de ductilité MALLET
	Cu	Zn	Cu	Zn					
	17,5	82,5	17,49	81,62	7.225	gris bleu	grain fin	3.766	»
$CuZn_5$	16,36	83,64	»	»	6.605	gris très sombre	finement cristalline	2.838	0
$CuZn_5$	16,30	83,70	»	»	7.442			»	»
	15	85	14,19	85,10	7.163	gris bleu	grain fin	5.984	»
	12,5	87,5	12,12	86,67	7.238			8.738	»
$CuZn_8$	10,82	89,18	»	89,90	8.315			»	»
	10	90	10,30	88,88	7.253	id.	id.	10.172	»
	7,5	92,5	7,20	92,07	7.131	id.	id.	7.497	»
	5	95	4,35	94,59	7.108	id.	finement cristalline	12.717	»
	2,5	97,5	2,45	96,43	7.080	id.	cristaux tabulaires	8.025	»
	0	100	»	»	7.143	gris bleuâtre	id.	3.801	»
	0	100	»	»	6.895	gris bleu	id.	23.969	13
	0	100	»	»	7.148			»	»
	0	100	»	»	»			»	»
	0	100	»	»	»			»	»

Les recherches de Thurston, dont nous allons maintenant donner les résultats, ont été faites dans les conditions suivantes :

Les barres obtenues par fusion directe étaient d'abord essayées à la flexion. Les deux morceaux provenant de chaque essai de flexion étaient tournés et essayés à la traction et les quatre fragments ainsi obtenus étaient essayés à la torsion ; quelques essais furent effectués par compression. Les tournures obtenues dans la confection des barreaux de traction étaient analysées. On déterminait aussi le poids spécifique. Le

DUCTILITÉ relative THURSTON	DURETÉ CALVERT, MALLET, JOHNSON	ORDRE de malléabilité MALLET	ORDRE de fusibilité MALLET	CONDUCTIBILITÉ POUR LA CHALEUR Ag = 100	CONDUCTIBILITÉ POUR L'ÉLECTRICITÉ Ag = 100	RÉFÉRENCES	REMARQUES
0,003	»	»	»	»	»	USB	
»	11	17	2	»	»	Ml	Brisant.
»	cassé	»	»	59,5	»	CJ	
0,004	»	»	»	»	»	USB	
0,009	»	»	»	»	»	USB	
»	»	»	»	»	»	Ri	Poids spécifique du lingot : 7,299.
0,10	»	»	»	»	»	USB	
8,04	»	»	»	»	»	USB	
0,84	»	»	»	»	»	USB	
2,67	»	»	»	»	»	USB	
26,51	»	»	»	»	»	USB	
»	23	12	1	»	»	Ml	Brisant.
»	»	»	»	29,02	27,39	Ma	
»	»	»	»	62,8	»	CJ	
»	»	»	»	28,1	27,3	We	

poids total de chaque moulage était de 4^{kg},5. On ne saurait trop s'élever contre cette façon d'opérer, qui consiste à prendre pour faire un essai un barreau qui a déjà subi une opération, un traitement dont on ne peut tenir compte, et c'est fort justement que M. Charpy fait remarquer que l'on doit craindre que les essais à la traction et surtout les essais à la torsion effectués en dernier lieu n'aient été influencés par les déformations antérieurement subies par le métal.

Quoi qu'il en soit, nous donnons le tableau qui résume les recherches de Thurston :

COMPOSITION DU MÉLANGE		ANALYSE DE L'ALLIAGE		POIDS spécifique	ESSAIS A LA FLEXION SUR DES BARRES CARRÉES DE 0,025 DE CÔTÉ, DISTANCE DES APPUIS = 1m,10				
CUIVRE	ZINC	CUIVRE	ZINC		Module de rupture en kilogrammes par centimètre carré	LIMITE D'ÉLASTICITÉ	RÉSISTANCE VIVE en kilogrammes pour une flèche de 0,09	MODULE D'ÉLASTICITÉ en kilogrammes par centimètre carré	Flèche avant rupture en centimètres
90,0	10,0	90,56	9,42	8.773	»	57,9	»	»	»
87,5	12,5	88,94	10,97	8.747	»	»	»	»	»
85,0	15,0	89,80	10,06	8.656	»	53,3	»	»	»
82,5	17,5	82,93	16,98	8.633	1.623,8	41,2	22.673	1.009.759	non cassé
80,0	20,0	81,91	17,99	8.598	1.483,5	45,2	19.444	872.886	id.
77,5	22,5	77,39	22,45	8.574	1.776,2	44,4	21.110	1.031.412	id.
75,0	25,0	76,65	23,08	8.528	1.562,7	50,0	20.189	938.513	id.
72,5	27,5	73,20	26,47	8.465	1.808,6	43,2	26.164	915.696	id.
70,0	30,0	71,20	28,54	8.444	1.712,7	51,4	22.273	982.472	id.
67,5	32,5	69,74	30,06	8.384	1.885,1	46,1	27.138	879.601	id.
65,0	35,0	66,27	33,50	8.371	1.992,1	53,7	31.312	968.187	id.
62,5	37,5	63,44	36,36	8.411	3.026,1	53,3	36.825	987.090	id.
60,0	40,0	60,94	38,65	8.405	2.727,7	56,1	29.214	856.234	id.
57,5	42,5	58,49	41,10	8.363	4.431,3	47,5	54.427	829.500	id.
55,0	45,0	55,15	44,44	8.283	2.972,4	37,5	27.220	667.672	id.
52,5	47,5	54,86	44,78	8.301	3.356,8	38,8	39.116	757.122	id.
50,0	50,0	49,66	50,14	8.291	2.342,7	34,0	9.498	810.214	0,5
47,5	52,5	48,99	50,82	8.216	2.813,2	43,6	4.097	889.008	0,24
45,0	55,0	47,56	52,28	»	3.392,9	33,1	12.644	981.908	0,46
42,5	57,5	43,36	56,22	8.034	1.278,4	100,0	0.316	904.274	0,04
40,0	60,0	41,30	58,12	8.061	543,7	100,0	0.044	1.145.674	0,012
37,5	62,5	38,36	61,05	7.982	471,9	100,0	0.049	715.395	0,016

ESSAIS A LA TRACTION					ESSAIS A LA COMPRESSION		ESSAIS A LA TORSION			
CHARGE DE RUPTURE par millimètre carré		LIMITE D'ÉLASTICITÉ	ALLONGEMENT 0/0	RAPPORT DES SECTIONS de rupture et primitive	CHARGE à l'écrasement par millimètre carré	CONTRACTION 0/0	MOMENT DE TORSION en kilogrammes		DUCTILITÉ	
de la section primitive	de la section de rupture						Maximum	Limite d'élasticité	Angle de torsion en degrés	Extension de la fibre extérieure
»	»	»	»	»	21,2	10,0	19.320	17,2	458,0	1,69
»	»	»	»	»	»	»	15.842	16,6	380,0	0,60
»	»	»	»	»	20,8	10,0	14.462	27,9	607,0	2,50
22,1	40,1	26,1	26,7	0,76	»	»	21.431	28,7	328,8	1,05
22,1	40,6	30,6	31,4	0,75	»	»	22.894	27,5	344,8	1,13
25,0	48,0	20,0	35,5	0,72	»	»	23.363	30,9	311,5	0,97
21,4	35,8	24,6	35,8	0,79	29,5	10,0	22.839	26,0	266,5	0,76
21,5	41,2	23,7	38,5	0,74	»	»	23.266	28,3	292,7	0,88
21,4	34,8	29,5	29,2	0,79	»	»	22.576	24,0	268,7	0,77
19,8	27,2	28,7	20,7	0,85	»	»	19.789	23,9	202,3	0,49
26,5	46,2	25,1	37,7	0,75	»	»	24.370	29,4	256,8	0,72
32,5	49,2	32,8	31,7	0,83	»	»	27.889	27,0	229,8	0,60
28,5	40,3	40,1	20,67	0,84	53,0	10,0	26.716	29,4	201,8	0,48
35,4	42,7	54,4	10,09	0,90	»	»	31.326	30,6	92,5	0,12
31,1	40,6	44,0	15,31	0,89	54,9	10,0	28.800	32,7	109,0	0,19
32,6	37,8	53,9	7,97	0,92	»	»	30.801	24,4	71,5	0,07
21,8	24,3	54,5	4,07	0,96	82,5	10,0	23.763	36,0	37,8	0,03
18,3	26,2	100,0	0,84	0,98	»	»	24.370	36,5	15,5	0,003
17,0	17,2	100,0	0,79	0,99	85,0	10,0	21.321	38,5	13,1	0,002
6,4	6,4	100,0	»	»	»	»	12.175	100,0	2,3	»
2,6	2,6	100,0	»	»	»	»	2.526	100,0	1,8	»
1,1	1,1	100,0	»	»	»	»	1.426	100,0	0,75	»

Critiquant les résultats obtenus, Thurston fait remarquer que les courbes de résistance à différentes sortes d'efforts montrent qu'elles ont une relation déterminée dépendant de la composition dans certaines régions, mais suivant des lois très différentes dans d'autres régions.

Les alliages contenant de 17 à 30 0/0 de zinc montrent une remarquable uniformité dans toutes leurs propriétés. Ils ont presque tous la même résistance et presque la même ductilité, cette dernière décroissant légèrement quand la proportion du zinc augmente. Ils sont semblables de couleur et d'aspect, au point qu'on peut à peine les distinguer les uns des autres. Leurs modules d'élasticité sont à peu près les mêmes.

Toutes les barres contenant moins de 11 0/0 de zinc sont défectueuses et leurs résistances sont certainement plus faibles que celles que l'on aurait observées avec des moulages sains.

Entre les compositions contenant 30 à 36 0/0 de zinc, il se produit une rapide augmentation de la résistance.

Entre les compositions contenant 36 à 52 0/0 de zinc se trouve un autre groupe d'alliages, qui comprend l'alliage de résistance maximum à la flexion, la traction, la torsion, mais non à la compression. L'alliage de résistance maximum contient environ 41 0/0 de zinc. La résistance à la compression de ce groupe ne présente aucune relation avec les résistances à la traction, à la flexion, à la torsion; elle augmente régulièrement avec la proportion du zinc; le maximum de résistance à la compression est probablement atteint pour un alliage contenant plus de 55 0/0 de zinc. La ductilité de ce groupe ne présente aucune relation avec la résistance; elle décroît toujours quand la proportion de zinc augmente.

Les résultats obtenus par Thurston sont résumés dans les diagrammes de la figure 168.

Guettier, dans son livre *la Fonderie en France* (1882), s'exprime de la façon suivante sur les propriétés des alliages cuivre-zinc :

« La malléabilité, la ductilité, la douceur, la finesse du grain

semblent croître en même temps que la proportion de zinc augmente, disparaître quand la proportion des deux métaux tend à s'égaliser, puis revenir à un degré moins prononcé, mais sensible, quand la base est fournie par le zinc.

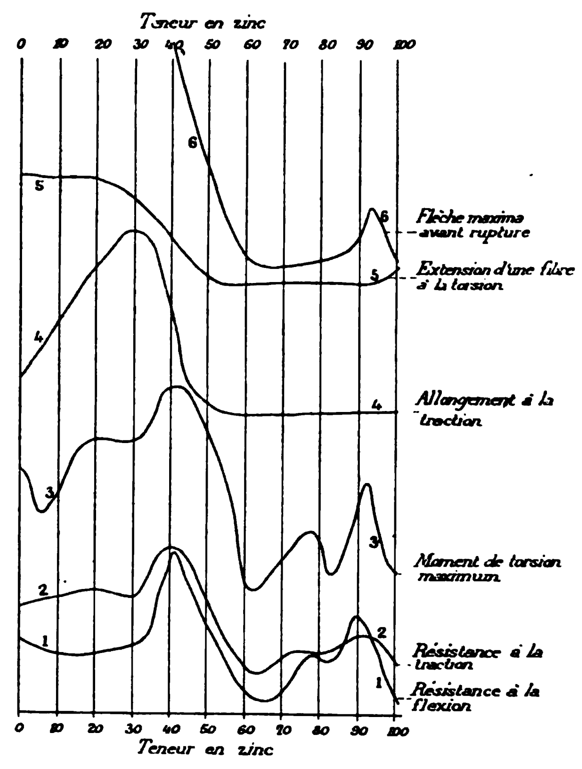


Fig. 168. — Diagrammes de Thurston.

« Depuis l'alliage cuivre 99-zinc 1 jusqu'à celui de ces deux métaux en quantités égales, les alliages cuivre-zinc sont tous d'un usage industriel bien constaté[1]. A faibles doses de zinc, comme dans tous les alliages qui ne dépassent pas 80 de cuivre et 20 de zinc, les composés sont nerveux, tenaces, très malléables, très ductiles, et leur défaut le plus essentiel est de n'être pas économiques.

1. Ceci est faux ; on ne descend pas au-dessous de 54 0/0 Cu.

« Les composés qui prennent leur place entre les proportions cuivre 80-zinc 20 et cuivre 65-zinc 35 sont ceux que les besoins de l'industrie empruntent le plus souvent. Les cuivres dits laitons, ou alliages cuivre-zinc employés pour la construction des machines sont le plus souvent composés aux proportions cuivre 75-zinc 25[1]. L'économie à obtenir indique s'il est nécessaire de tenir la proportion du zinc au-dessus ou au-dessous de cette limite.

« L'alliage par parties égales, cuivre 50-zinc 50, où déjà la combinaison est difficile parce qu'il s'y perd une grande quantité de zinc, nous a donné, en apparence, c'est-à-dire à l'examen de la texture et du poli après la lime, les caractères d'un bronze à partie d'étain (*sic*)... Mais si, à l'examen des qualités extérieures, cet alliage imite le bronze, on peut aisément reconnaître qu'il manque de dureté, de cohésion et même de couleur, car son poli, un instant éclatant, est bientôt terni.

« Les usines qui fabriquent du laiton en planches et en fils n'ont pas manqué d'essayer les alliages cuivre et zinc à leurs diverses proportions ; elles ont trouvé des résultats peu en rapport avec leurs besoins, en tenant le cuivre au-dessous de la proportion Cu 65. Leurs essais au-delà de cette combinaison coïncident avec les nôtres. Nous en citerons quelques-uns à titre de documents comparatifs.

CUIVRE	ZINC	
30	70	Alliage sec. Cassure grise et lamelleuse à la manière du zinc.
35	65	Sec et plus fragile que le verre, cassure conchoïde et brillante comme de l'argent.
40	60	Même sécheresse ; fragilité et éclat avec légère nuance jaune.
45	55	Cassant, d'une couleur gris rougeâtre ou violâtre à la cassure.
50	50	Peu tenace, s'arrachant par filaments d'un beau jaune d'or. Très dur, à la lime qui fait disparaître cette belle couleur.
55	45	Plus tenace et plus résistant que le précédent ; les stries de la cassure deviennent un peu plates, avec lamelles, les unes jaunes, les autres rougeâtres.
60	40	Résistant. Il a fallu commencer à l'ouvrir avec la tranche pour le rompre ; les lamelles de la cassure sont plates et d'un gris jaune.

1. Nous verrons que cette appréciation de Guettier est absolument erronée; actuellement du moins, les laitons industriels les plus importants sont ceux renfermant de 72 à 55 0/0 de cuivre.

« Ces alliages viennent confirmer ce que nous avons dit en principe, que les combinaisons les plus utiles sont celles qui se trouvent placées entre les proportions Cu 80-Zn 20; et Cu 65-Zn 35.

La composition du métal destiné au laminage demeurerait sensiblement dans les limites 2 Cu et 1 Zn, pour ce qui concerne les laitons dits de premier titre. Il semble démontré qu'une proportion de zinc plus faible ne donnerait pas un métal malléable à chaud, au même degré du moins que celui dont nous parlons et sans l'assistance plus ou moins prononcée du plomb et de l'étain[1]. Mais, dans les laitons dits de deuxième titre, on est parvenu à introduire du zinc jusqu'à la proportion de 40 parties sur 60 parties de cuivre. La couleur de cet alliage est d'un blanc pâle[2]; la cassure présente une structure fine et serrée; la densité atteint 8,45, tandis que, par le calcul, elle ne devrait donner que 8 environ, d'où il faut conclure qu'il y a contraction dans la formation de l'alliage. L'alliage, qui doit être considéré comme un composé chimique à proportions définies, est plus dur que le cuivre, très difficile à rompre, malléable au point de se forger aisément à chaud et de subir l'opération du planage à froid. »

Bien qu'il y ait dans cette description d'importantes erreurs, on y trouve tracées les principales caractéristiques des alliages cuivre, zinc, et il est très curieux de noter, dès l'époque à laquelle remonte l'ouvrage (1882), l'idée très nettement exprimée du composé défini.

D'autre part, M. Behrens, dans son remarquable livre sur *les Alliages*, donne quelques propriétés intéressantes.

M. Behrens dit : « A la température du rouge, tous les laitons contenant 40 à 50 0/0 de zinc sont ductiles[3]. Cette propriété provient probablement de l'alliage CuZn, qui domine de plus

1. Ceci est encore faux. L'alliage Cu = 66,6, Zn = 33,3 n'est pas malléable à chaud.

2. C'est une erreur, l'alliage est or.

3. Comme nous l'avons dit, c'est de 38 à 45 0/0 de zinc que les laitons sont ductiles à chaud.

en plus. Les rangées de cristaux deviennent plus minces et plus rares; la différence de coloration entre les cristaux et la masse fondamentale s'unifie; dans la dernière, une texture cristalline grenue augmente de plus en plus. Dans le laiton à 50 0/0 de zinc, il ne reste rien de la texture tricotée décrite plus haut. Les surfaces attaquées montrent le reflet soyeux propre au cuivre cristallin et, sous un grossissement de 100 diamètres, on voit la même construction de cubes très petits disposés en rangées.

« La dureté des alliages de cuivre et de zinc qui, jusqu'à 50 0/0, restait presque sans changement, augmente rapidement entre 50 et 60 0/0 de zinc. La dureté et la fragilité augmentent avec la teneur en zinc jusqu'aux environs de 70 0/0, où l'on atteint un point critique. La dureté la plus grande semble appartenir à l'alliage $CuZn^2$. Cet alliage est uniformément cuivré dans l'acide sulfurique étendu; çà et là se montrent de petits cubes, tandis que d'autres places restent unies; en outre, il se présente des cavités en forme de polygones irréguliers qui expliquent l'état cassant du métal. Il sera difficile d'établir si la formule $CuZn^2$ appartient à la série à fins cristaux ou à la catégorie amorphe, car la volatilité du zinc empêche une seconde fusion et rend difficile d'obtenir un mélange uniforme. Dans beaucoup de morceaux, cet alliage rappelle le bronze Cu^4Sn et dénote, comme ce dernier, un point critique dans une série d'alliages. Jusqu'à CuZn, les alliages de cuivre et de zinc sont mous, faciles à faire cristalliser; à partir de là la dureté augmente jusqu'à l'alliage $CuZn^2$ (67,2 0/0 de zinc), aux environs duquel la couleur passe du jaune au gris, et l'aptitude à la cristallisation disparaît complètement pour reparaître avec augmentation de la teneur en zinc et diminution simultanée de la dureté. »

Nous avons déjà cité, dans le cours de ce travail, les mémoires de MM. Pralon, A. Le Chatelier, Guillemin; dans l'ouvrage du professeur Thurston, sont signalés les travaux de Bolley, Crookwitt, Calvert et Johnson, Matthiessen, Mallet, Riche; il nous reste à résumer les importantes et très nettes recherches

de M. Georges Charpy, qui ont complètement mis au point cette importante question.

Recherches de M. Charpy. — Le programme suivi par M. Charpy a été le suivant :

Préparer des alliages de cuivre et de zinc de composition régulièrement variée, amener ces alliages par des martelages et laminages successifs à froid, sans aucun recuit, à un état d'écrouissage aussi accentué que possible. Dans des alliages ainsi écrouis prélever des éprouvettes et les recuire à des températures graduellement croissantes jusqu'au point de fusion; déterminer les propriétés mécaniques et la structure microscopique qui correspondent à ces différents états.

Les alliages utilisés par M. Charpy avaient les teneurs en zinc du tableau suivant :

NUMÉROS	TENEUR en zinc 0/0	NUMÉROS	TENEUR en zinc 0/0
1	14,3	10	60,1
2	20,2	11	80,1
3	29,0	12	99,6
4	0,0	13	27,1
5	10,1	14	32,3
6	18,4	15	34,7
7	30,2	16	37,6
8	40,4	17	41,7
9	49,7	18	44,7

De 1 à 3 les alliages forment une première série; ils ont été préparés au moyen de cuivre électrolytique et de zinc distillé. Ils contenaient environ 0,2 0/0 d'impuretés (surtout du plomb). Les alliages de 4 à 13 et de 14 à 18 forment deux autres séries, qui ont été préparées industriellement et contenant de 0,3 à 0,4 0/0 d'impuretés (plomb, étain, fer).

Les alliages renfermant 49,7; 60,1; 80,1 0/0 de zinc n'ont pu supporter aucun travail de laminage; l'alliage à 49,7 et 80,1 0/0 a pu être découpé pour fournir des éprouvettes. Mais l'alliage à 60,1 est brisant comme du verre; on n'a pas pu

l'essayer. Les essais effectués par M. Charpy ont été des essais à la traction, à la compression et au choc, ces derniers ont été effectués en soumettant au choc d'un mouton de 10 kilogrammes des barreaux de $14 \times 9 \times 60$ millimètres encastrés à une extrémité. Le mouton tombait successivement de 10, 20, 30 centimètres jusqu'à rupture ou ployage à 90 0/0. On notait l'angle de ployage après chaque coup de mouton.

Enfin il a été fait quelques essais de dureté au moyen d'un poinçon dont on mesurait la pénétration sous charge déterminée. M. Charpy a, tout d'abord, cherché à définir l'influence du recuit sur les propriétés mécaniques. A ce sujet, il est arrivé aux résultats suivants :

Pour tous les alliages étudiés, lorsqu'on chauffe un métal écroui à des températures graduellement croissantes, on produit une diminution de la charge de rupture, une augmentation de l'allongement et une diminution de la section de rupture d'autant plus marquées que la température est plus élevée, sauf dans quelques cas pour les températures voisines du point de fusion où le métal *se brûle*, l'allongement diminuant alors en même temps que la résistance. — Toutefois ce phénomène n'est pas continu.

En partant de la température ordinaire, on trouve d'abord que le recuit est nul, tant que la température n'a pas dépassé une certaine limite ; cette limite dépend essentiellement de l'état d'écrouissage du métal ; plus le métal est écroui, plus il faut le chauffer pour commencer à détruire cet état. Quand on a dépassé la température au-dessus de laquelle commence le recuit, on trouve une zone de température, dans laquelle le degré de recuit qui est défini par la variation de charge de rupture et d'allongement augmente quand on élève la température. Puis, à partir d'une certaine température, l'effet du recuit est constant, l'écrouissage a été complètement détruit, le recuit est complet. Enfin à une température très élevée, très voisine du point de fusion, il se produit un phénomène nouveau, qui donne naissance au *métal brûlé* suivant l'expression industrielle.

En somme, d'après ces recherches, le phénomène de recuit présente quatre périodes :

1° La zone de température n'ayant aucune influence sur les propriétés du métal ;

2° La zone de température pendant laquelle l'état d'écrouissage diminue, et cela d'autant plus que la température est plus élevée ;

3° La zone de température pendant laquelle les propriétés du métal restent constantes; il est alors à son maximum de malléabilité ;

4° La zone de température, qui donne au métal des propriétés nouvelles (diminution dans les allongements et dans la charge de rupture) : le métal est brûlé.

Comme exemple de l'influence du recuit sur les propriétés d'un laiton, nous citerons les résultats des expériences de M. Charpy sur les charges de rupture du laiton à 70 0/0 de cuivre et 30 0/0 de zinc.

TEMPÉRATURE DE RECUIT	ALLIAGE 70 Cu, 30 Zn
0 degré	49,5
200 —	51,2
280 —	46,5
420 —	34,0
500 —	34,0
560 —	30,0
600 —	27,5
650 —	27,5
730 —	29,3
780 —	28,7
800 —	28,7
850 —	27,5

Pour l'alliage à 70 0/0 de cuivre, les propriétés du métal recuit à haute température n'apparaissent qu'après chauffage au-dessus de 600° environ. Pour un recuit plus faible, on a une charge de rupture plus élevée et un allongement plus faible. Pour ce qui est de la dernière zone de tempéra-

ture, celle dans laquelle se produit le métal brûlé, M. Charpy croit que la température à laquelle ce phénomène commence est d'autant plus faible que les impuretés sont en plus grandes quantités.

Il faut bien se rappeler que ces impuretés sont généralement d'autant plus grandes que le zinc est important. Dans une étude sur laquelle nous reviendrons, M. le commandant Pralon dit que le laiton à cartouches (67 0/0 de cuivre, 33 0/0 de zinc) se brûle dès 600°. Cette température nous semble basse; il faut d'ailleurs remarquer que cette température n'a été évaluée que d'une façon approchée, au moyen d'un pyromètre à circulation d'eau placée dans le four.

M. Charpy a montré lui-même qu'un alliage renfermant 0,15 d'étain et 0,20 de plomb a été brûlé vers 800°, tandis qu'un autre alliage renfermant les mêmes quantités de cuivre et de zinc et ne contenant pas d'impuretés n'est pas brûlé à 900°. De l'ensemble de ces essais M. Charpy conclut :

Pour des alliages purs qu'il est malheureusement à peu près impossible de réaliser, la loi du recuit serait la suivante : partant d'un métal complètement écroui à une température donnée, c'est-à-dire se rompant sans déformation aucune, on obtiendra, en élevant graduellement la température, d'abord une diminution graduelle de la charge de rupture, une augmentation correspondante de l'allongement, puis au-dessus d'une certaine température, la charge et l'allongement restent constants jusqu'à une petite distance du point de fusion. Cette zone de recuit complet aurait une étendue de plus en plus petite à mesure que la teneur en zinc augmente, la limite inférieure s'élevant en même temps que s'abaisse la limite supérieure, par suite de l'abaissement du point de fusion.

M. Charpy a comparé les propriétés des alliages cuivre-zinc à l'état *recuit complet*. Le tableau suivant donne les résultats moyens obtenus.

	NUMÉRO de L'ALLIAGE	CHARGE de RUPTURE	ALLONGEMENT 0/0	STRICTION
		Kilog.		
Première série.........	1	24,0	43,8	»
	2	27,2	47,2	»
	3	27,8	53,7	»
Deuxième série.........	4	21,84	31,61	0,66
	5	24,1	36,0	0,56
	6	26,8	41,4	0,53
	7	28,9	56,7	0,57
	8	38,4	35,2	0,58
	9	10,0	2,0	0,97
Troisième série.........	13	32,4	57,5	0,52
	14	32,1	55,7	0,54
	15	31,7	52,1	0,54
	16	37,0	48,0	0,52
	17	42,4	33,9	0,60
	18	48,0	18,3	0,87

Ces résultats sont résumés dans les courbes ci-jointes (*fig.* 169). On voit que la variation est régulière; quand on part du cuivre rouge, la charge de rupture augmente d'une manière continue, lentement d'abord, puis plus rapidement quand la teneur en zinc atteint 35 0/0, passe par un maximum pour une teneur en zinc voisine de 44 0/0 et décroît ensuite rapidement. L'allongement croît également avec la teneur en zinc, passe par un maximum quand la teneur en zinc est de 30 0/0 et décroît ensuite rapidement.

Les essais de compression ont conduit aux mêmes résultats que les essais de traction pour ce qui est relatif à l'influence de la température de recuit.

Les essais faits sur les alliages complètement recuits ont prouvé que la résistance à la compression varierait en sens inverse de l'allongement à la traction.

Les essais à la pénétration pratiqués dans les mêmes conditions ont montré que la résistance à la pénétration varie en fonction de la teneur en zinc; elle augmente lentement d'abord, puis rapidement lorsque la proportion de zinc dépasse 30 0/0. On n'observe pas de maximum jusqu'à l'alliage à 50 0/0 de

zinc; pour des alliages plus riches en zinc, les expériences ne sont plus possibles, les métaux étant trop brisants.

Enfin les essais au choc ont montré, du moins avec le procédé utilisé, que la fragilité est négligeable tant que la teneur en zinc est inférieure à 43 0/0. Elle apparaît dans l'alliage à 45 0/0 de zinc, et ensuite elle croît très rapidement avec la

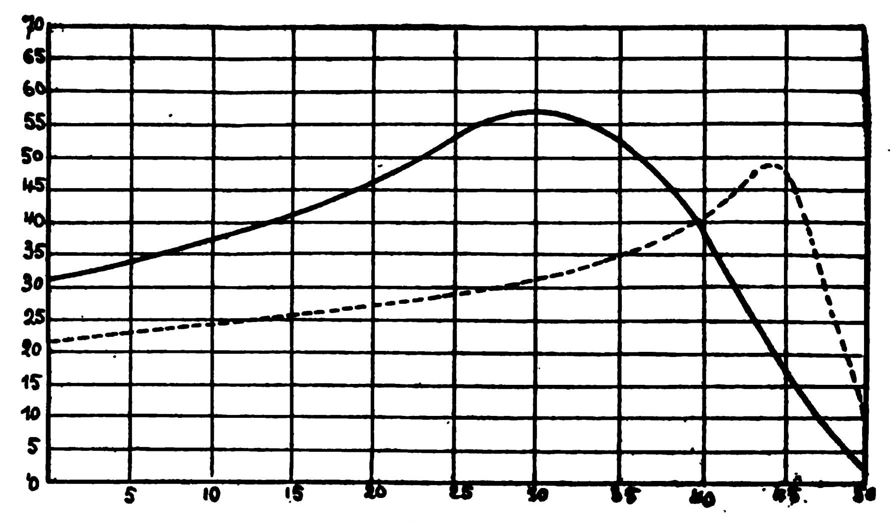


Fig. 169. — Diagramme de Charpy.

La courbe des résistances est en pointillé; celle des allongements en traits pleins. Sur l'axe des x on a porté la teneur en zinc.

teneur en ce métal. Les alliages qui en contiennent plus de 50 0/0 se brisent sous le plus faible choc.

En résumé, les conclusions des remarquables recherches de M. Charpy sont les suivantes :

Si l'on compare les alliages de cuivre et de zinc amenés à l'état de recuit complet, et qu'on cherche l'influence de la composition chimique sur les propriétés mécaniques, on trouve que ces propriétés varient toutes d'une façon continue avec la teneur en zinc; si l'on se borne à considérer les métaux contenant de 0 à 50 0/0 de zinc, les seuls susceptibles d'utilisation pratique, les propriétés mécaniques peuvent

se partager en quatre groupes correspondant à quatre modes de variation.

La limite élastique et la charge de rupture à la traction, la résistance à la pénétration augmentent d'une façon continue avec la teneur en zinc. La variation est beaucoup plus rapide quand la proportion de zinc varie de 30 à 45 0/0. A ce groupe de propriétés il faut joindre aussi la vitesse d'écrouissage.

L'allongement à la traction, l'allongement proportionnel et l'allongement de striction croissent avec la teneur en zinc, passent par un maximum pour l'alliage à 30 0/0 et décroissent ensuite rapidement.

La résistance à la compression, la striction décroissent quand la teneur en zinc augmentent, passent par un minimum pour l'alliage à 30 0/0 et croissent ensuite; la fragilité, qui ne devient sensible que lorsque la teneur en zinc atteint 45 0/0, varie alors comme la striction.

Et M. Charpy tire de ces recherches des conclusions réellement intéressantes pour l'industrie : Dans les applications pratiques, il sera bon de ne pas dépasser une proportion de 45 0/0 de zinc, à cause de l'apparition de la fragilité; d'autre part, il n'y aura aucun intérêt à employer des alliages contenant moins de 30 0/0 de zinc, qui deviennent plus coûteux et dans lesquels on a, à la fois, moins de résistance et moins de malléabilité[1]. En faisant varier la proportion de zinc entre 30 et 43 0/0, on aura toute une série de métaux de nuances différentes, le plus malléable ayant jusqu'à 60 0/0 d'allongement avec une résistance à la rupture de 27 à 28 kilogrammes; le plus tenace ayant encore plus de 40 0/0 d'allongement avec une résistance de 37 à 38 kilogrammes, en ne considérant que l'état de recuit complet; avec un emploi judicieux du recuit et de l'écrouissage, on pourra augmenter la résistance jusqu'à 60 kilogrammes environ pour des barres et des tôles et beaucoup plus loin pour des fils.

1. Il y a cependant un facteur qui joue un rôle parfois important; nous voulons parler de la coloration, qui fait préférer dans certains cas des alliages à très faibles teneurs en zinc.

UTILISATIONS

Nous avons déjà vu que les seuls alliages industriels de cuivre et de zinc étaient ceux renfermant moins de 43 0/0 de zinc.

Nous examinerons les diverses utilisations de ces alliages; mais il est nécessaire de faire de suite remarquer que les produits industriels renferment toujours quelques quantités de produits étrangers, soit comme impuretés, soit que ces produits aient été introduits volontairement pour modifier plus ou moins légèrement les propriétés.

Dans le chapitre suivant, consacré aux laitons spéciaux, nous examinerons en détail l'influence des différents éléments sur les alliages cuivre-zinc.

Nous étudierons ces alliages suivant leurs modes d'emploi.

1° **Alliages pour la fabrication des planches.** — Les alliages généralement employés pour la confection des planches contiennent de 66 à 73 0/0 de cuivre et 34 à 27 0/0 de zinc. On descend parfois, comme nous le disons plus loin, à une teneur de 60 0/0 de cuivre. De même, on atteint pour la bijouterie les teneurs de 90 et même de 94 0/0 de cuivre.

Les planches de laiton, qui se vendent à l'état recuit ou écroui, sont destinées à de nombreuses fabrications dont les principales sont : les objets obtenus par emboutissage et repoussage, tels que les douilles de cartouches, les dés, certains ornements, etc.

On sait aussi que l'on part souvent de planches pour obtenir les fils, ainsi que nous l'avons indiqué plus haut.

Les planches destinées à la confection des cartouches ont des titres différents suivant les pays; voici les principaux :

France	67 cuivre	33 zinc
Belgique	68 —	32 —
Allemagne	72 —	38 —
Angleterre	id. —	id. —
Autriche-Hongrie	id. —	id. —
Espagne	id. —	id. —
Suisse	id. —	id. —

On peut justement s'étonner de variations aussi grandes.

Il est bon d'ajouter que notre laiton 67-33 a fait l'objet d'études extrêmement suivies, dont la plus importante est assurément celle de M. le commandant Pralon.

Les plaques qui sont employées pour le doublage des navires sont faites en un alliage de composition.

Cu	60
Zn	40

Il constitue le métal Muntz sur lequel nous devons insister :

C'est en 1832 que M. Georges-Frédéric Muntz, de Birmingham, a pris son premier brevet pour le métal jaune destiné au doublage de la carène des navires. Les proportions admises étaient 60 0/0 Cu, 40 0/0 Zn ; mais il était également indiqué que l'on pourrait faire varier le pourcentage de cuivre de 56 à 63 0/0, et celui de zinc de 44 à 37 0/0. D'après le brevet, le métal est fondu en lingots et laminé en feuilles, *lorsqu'il est encore chaud;* ensuite on découpe et on lave.

Les mêmes alliages furent appliqués par Muntz à la confection des chevilles, des boulons, utilisés dans les constructions navales, etc...

En 1848, il fit breveter un alliage renfermant du plomb :

Cu	56
Zn	40,25
Pb	3,75

On voit qu'approximativement on a substitué 4 0/0 de plomb au cuivre. Cet alliage se lamine fort bien à chaud.

Nous étudierons d'ailleurs en détail les laitons au plomb dans le chapitre suivant.

En peu de temps le métal Muntz s'est substitué au cuivre pour le doublage des navires; son prix est beaucoup moins élevé que celui du cuivre. La teneur en zinc doit être inférieure à 48 0/0, sans cela il y a fragilité, et supérieure à 32 0/0, sans quoi il y a trop grande usure à l'eau de mer. Nous revien-

drons d'ailleurs en détail sur les alliages résistant à l'eau de mer dans le chapitre suivant. Disons cependant de suite que cet alliage a été tout spécialement étudié par M. Bobierre, professeur à l'École de Sciences de Nantes, qui a montré tous les inconvénients du bronze et tous les avantages du métal Muntz. A l'heure actuelle, d'ailleurs, on ne fait presque plus de doublage de navire.

En dehors de ces alliages, il en est d'autres qui ne sont utilisés que pour des usages très particuliers, notamment pour la fausse bijouterie, la préparation d'ornements ou objets pour ameublements. Nous les passerons rapidement en revue.

Il faut citer tout d'abord les alliages désignés autrefois sous le nom de *tombac*, *métal du Prince*, *or de Mannheim* ou *similor*.

Indifféremment, sous ces divers noms, on englobait des alliages renfermant plus de 80 0/0 de cuivre, mais de compositions très différentes ; voici les principaux types :

1°	Cu........................	99,15
	Zn........................	0,85

ou :

	Cu........................	97,80
	Zn........................	2,20

employé surtout pour la fabrication des boutons ;

2°	Cu........................	92,0
	Zn........................	8,0

vendu sous le nom de tombac de Paris ;

3°	Cu........................	90
	Zn........................	10
4°	Cu........................	85,5
	Zn........................	14,5
5°	Cu........................	82,75
	Zn........................	16,40
	Sn........................	0,55
	Fe........................	0,30

Ces trois derniers alliages, qui possèdent une couleur or très belle, sont le plus souvent vendus sous le nom d'*oréides*. Ils peuvent acquérir un magnifique poli et sont utilisés pour ornements.

6°	Cu	80,0
	Zn	20,0

connu actuellement sous le nom de tombac français.

Tous ces alliages sont employés pour la confection de bijouterie bon marché, d'objets de Paris, etc.

7°	Cu	83
	Zn	17

Ce métal est surtout employé pour la dorure ; il se lamine en feuilles très minces.

Disons enfin que le *clinquant* ordinaire est généralement obtenu en partant de l'alliage :

Cu	70 0/0
Zn	30 0/0

Les planches en

Cu	67
Zn	33

sont dites de premier titre.

Les planches en

Cu	65
Zn	35

sont dites en titre mixte.

2° **Alliages pour pièces obtenues par décolletage.** — Le laiton de décolletage ordinaire est du type :

Cu	58 à 60
Zn	42 à 40

Il peut donc être préparé par laminage à froid ou à chaud.

Ce laiton n'est jamais pur, il est généralement fabriqué en partant des déchets de fabrication (tournures, déchets d'emboutissage, etc.); de plus, on y met intentionnellement du plomb depuis 1,5 jusqu'à 3 0/0. Ce métal, dont nous étudierons en détail l'influence dans le chapitre suivant, a pour but de rendre plus faciles et le laminage et le décolletage. Le métal, en effet, ne forme plus de copeaux et, suivant l'expression d'atelier, il ne *bourre* pas l'outil.

Il est, d'ailleurs, très difficile de se rendre compte bien exactement de ces différences, qui dépendent essentiellement du mode de travail usité; en effet, on sera peut-être fort étonné d'apprendre que cette partie de l'usinage que l'on nomme le décolletage se fait encore par les procédés les plus barbares. Il faut donner comme exceptions quelques industriels qui, comme outillage et méthode de travail, se sont absolument modernisés; mais il est encore au centre de Paris de ces décolleteurs qui utilisent des méthodes antiques, telle que le *travail à sec*, c'est-à-dire sans que l'outil de décolletage soit arrosé.

Souvent le laiton de décolletage doit jouir de qualités spéciales. On demandera soit des propriétés mécaniques définies, soit des colorations spéciales, soit la soudabilité, etc.

Il faut alors des types bien définis; les plus employés sont :

1° Le type :

Cu	60 0/0
Zn	40 0/0

auquel on demande souvent :

R	30
A	30 0/0

2° Le type :

Cu	62 0/0
Zn	38 0/0

Cet alliage est vendu généralement sous le nom de *laiton titre mixte*.

On peut lui demander :

R.........................	35
A.........................	35 0/0

3° Le type :

Cu.........................	67 0/0
Zn.........................	33 0/0

connu sous le nom de *laiton premier titre*.

Il est cependant moins employé que les précédents.

En général on utilise le laiton ordinaire :

Cu............................	60
Zn............................	40

impur, dit *laiton second titre*. Il sert pour tout ce qui est pièce de robinetterie, écrou, vis, etc.

Le laiton titre mixte est utilisé surtout pour les pièces devant être soudées, pour l'estampage, etc.

Enfin le laiton premier titre est utilisé pour faire les vis à bois (on prend même souvent des alliages plus riches et renfermant jusqu'à 70 0/0 de cuivre), les pièces estampées, etc.

On utilise également, pour des usages spéciaux, des alliages plus riches encore, notamment des produits renfermant de 80 à 90 0/0 de cuivre et généralement un peu de plomb de 1 à 3 0/0.

Les alliages les plus répandus sont les suivants :

1°	Cu...........................	91
	Zn...........................	9
2°	Cu...........................	90
	Zn...........................	8
	Pb...........................	2
3°	Cu...........................	90
	Zn...........................	10

4°	Cu	88
	Zn	10
	Pb	2
5°	Cu	86
	Zn	14
6°	Cu	80
	Zn	17
	Pb	3

Ces alliages rentrent dans la catégorie des produits connus sous le nom de *Tombac*. Nous avons indiqué un certain nombre d'alliages analogues à propos de planches. Ces alliages peuvent évidemment être préparés en barres.

L'un des plus importants est l'alliage

Cu	90
Zn	10

utilisé en France pour les balles Lebel.

Il faut encore citer quelques autres produits très usités pour la joaillerie à bas prix, et que l'on vendait, les uns comme les autres, sous le nom d'or d'Abyssinie, de Talmi, d'or Talmi, etc.

Voici les alliages cités par Hiorns, à ce sujet :

6°	Cu	93,5
	Zn	6,5
7°	Cu	90
	Zn	9
	Au	1
8°	Cu	88,0
	Zn	11,5
	Au	0,5
9°	Cu	87
	Zn	13
10°	Cu	85
	Zn	15
11°	Cu	86,4
	Zn	12,2
	Sn	1,4

Ces derniers types de laiton sont généralement dorés superficiellement. On remarquera que deux d'entre eux contiennent un peu d'or. Nous avons cru devoir cependant les citer dans ce paragraphe ; de par leur composition, ce sont bien, en somme, des laitons.

3° **Alliages pour pièces fondues.** — Les alliages cuivre-zinc utilisés pour le moulage sont extrêmement variables avec l'usage auquel les pièces sont destinées.

Cependant la composition utilisée est le plus ordinairement la suivante :

Cu	66,5 à 67 0/0
Zn....................	33,5 à 33 0/0

C'est ce métal qu'en fonderie on désigne communément sous le nom de *jaune*.

Généralement on utilise de vieilles matières pour obtenir ce laiton ; le métal est toujours impur ; il contient du plomb, de l'étain, du fer, etc.

D'ailleurs, quand la pièce doit être travaillée ultérieurement et autrement que pour l'ébarbage et le polissage, on y ajoute intentionnellement 1 à 2 0/0 de plomb, qui a pour effet de rendre le travail au tour, à la lime, etc., beaucoup plus aisé, comme nous l'avons déjà dit.

Voici, en partant des alliages les plus riches en cuivre, les types les plus usités pour la confection des pièces moulées :

1°	Cu	72
	Zn	27
	Pb	1
2°	Cu	72
	Zn	25
	Pb	2
	Sn	1
3°	Cu	70
	Zn	30

Ces trois premiers types sont assez rarement usités. Toute-

fois le troisième est utilisé pour la gravure ou pour des pièces à braser, à marteler, etc.

4°	Cu	67
	Zn	33

C'est le laiton le plus courant avec les deux suivants :

5°	Cu	67
	Zn	32
	Pb	1
6°	Cu	66,5
	Zn	33
	Pb	0,5
7°	Cu	66
	Zn	31
	Pb	2,5
	Sn	0,5

utilisé dans différents cas par la Marine française.

8°	Cu	67
	Zn	27
	Pb	5
	Sn	1

C'est le métal anglais pour cloches.

9°	Cu	64,5
	Zn	33,5
	Pb	2

Cet alliage est employé couramment pour des objets sans résistance.

Enfin les deux derniers alliages que nous citerons sont les laitons coulés les plus communs :

10°	Cu	60
	Zn	37
	Sn	0,5
	Pb	2,5

11°	Cu	60
	Zn	38
	Sn	0,5
	Pb	1,5

Il faut également citer quelques alliages employés plus spécialement pour obtenir les statues, les pendules, etc. Ces alliages se travaillent très aisément, d'une part, et, d'autre part, sont très faciles à dorer et à bronzer. Ils contiennent tous, comme on le remarquera, du plomb et de l'étain.

Ces additions ont pour but de leur donner une couleur qui les rapproche des bronzes.

12°	Cu	82	
	Zn	18	
	Pb	1,5	
	Sn	3	(Total : 104,5)
13°	Cu	72	
	Zn	26	
	Pb	2	
	Sn	2	
14°	Cu	70	
	Zn	25	
	Pb	3	
	Sn	2	

Guettier (*Guide pratique des Alliages*, p. 205) recommande tout spécialement l'emploi des numéros 12 et 13.

15°	Cu	64
	Zn	33
	Pb	0,25
	Sn	2,75
16°	Cu	64
	Zn	33
	Pb	2,75
	Sn	0,25

Nous avons déjà examiné la composition des bronzes employés pour ce même usage.

4° **Alliages pour tubes.** — Les alliages employés pour la fabrication des tubes en laiton sont de deux types :

1°	Cu	65
	Zn	35

dit titre mixte pour tubes;

2°	Cu	70
	Zn	30

dit premier titre pour tubes.

Parfois on utilise des titres intermédiaires.

5° **Alliages pour fils.** — La composition du laiton destiné à faire du fil varie de 55 0/0 à 72 0/0 de cuivre.

Ici le métal doit contenir le moins possible de plomb.

On fait le fil en mêmes alliages que les barres et l'on distingue les trois titres :

Deuxième titre :

Cu	60
Zn	40

Titre mixte :

Cu	62 à 63
Zn	38 à 37

Premier titre :

Cu	67
Zn	33

On fait aussi des fils à des titres inférieurs au deuxième, renfermant notamment 58 0/0 de cuivre.

6° **Laitons blancs.** — Les laitons blancs sont formés par les alliages de cuivre et de zinc renfermant moins de 45 0/0 de cuivre et de zinc.

On sait qu'en effet au-dessous de ce pourcentage les alliages n'ont plus de couleur jaune. Ils sont blanc argent de 40 à 30 0/0 de cuivre, gris de 30 à 20 0/0 de cuivre, gris bleuté au-dessous de 20 0/0 de cuivre, rappelant alors la couleur du zinc; ces alliages, nous l'avons déjà dit, sont très cassants ; ils ne

peuvent être ni laminés ni tréfilés. Toutefois, certains ont reçu quelques applications intéressantes que nous ne saurions passer sous silence.

Tous ceux que nous allons citer servent à mouler des pièces. Certains peuvent être bronzés et sont même vendus sous le nom de bronze.

Hiorns (p. 130) attire l'attention sur les bronzes de Fontainemoreau, dont les principaux types sont :

Cu	8
Zn	90
Fonte	1
Pb	1
Cu	8
Zn	91
Pb	1
Cu	8
Zn	92
Cu	7
Zn	92
Pb	1
Cu	2,5
Zn	97
Pb	0,5
Cu	3
Zn	97
Cu	1
Zn	99

On voit que, dans l'un de ces alliages, on fait intervenir le fer sous forme de fonte.

Ces produits sont coulés en coquilles.

Les alliages de Sord sont employés pour un grand nombre de petits objets d'art ; les deux principales compositions sont :

Cu	1
Zn	98
Fe	1
Cu	10
Zn	80
Fe	10

Nous pensons que, malgré la présence de 1 0/0 de cuivre, les 10 0/0 de fer doivent être difficiles, si ce n'est impossible, *à bien allier.*

7° **Soudures et brasures.** — Certains alliages de cuivre et de zinc sont employés comme soudures ou comme brasures:

Comme soudures pour les laitons eux-mêmes;

Comme brasures pour les fers et aciers.

Le point qui doit intervenir dans le choix d'un alliage pour soudure, c'est la fusibilité. En effet la soudure doit être plus fusible que le métal à souder.

On utilise généralement pour le laiton un alliage à parties égales de cuivre et de zinc.

L'alliage :

Cu	34
Zn	66

forme une soudure très fusible, mais souvent trop fragile. — On utilise parfois le type plus complexe :

Cu	44
Zn	50
Sn	4
Pb	2

Plus on augmente la dose de cuivre, moins la soudure est fusible; mais plus elle est résistante, du moins jusqu'à une certaine limite. A ce point de vue on utilise parfois l'alliage :

Cu	53
Zn	47

Pour braser le fer, on utilise des alliages plus riches dont le point de fusion est élevé. On emploie généralement les compositions suivantes:

Cu	70
Zn	30

Cu	67
Zn	33

et même :

Cu	90
Zn	10

Les soudures sont généralement livrées sous forme de grains ou de petits morceaux. Pour obtenir la granulation du produit, on peut utiliser l'une des méthodes suivantes :

1° Pulvériser dans un mortier de fer le produit dès sa solidification, alors qu'il est encore très chaud ;

2° Placer le métal dans un mortier de fer, chauffer le tout, et pulvériser ;

3° Couler le métal sur la surface d'une boule de fer placée dans un récipient contenant de l'eau de façon qu'une partie de la boule soit immergée ;

4° Faire couler le métal dans de l'eau froide en interposant entre le métal et le liquide un fagot qui divise le premier au moment de la coulée ;

5° Faire couler le métal dans l'eau et faire arriver en même temps un jet d'eau horizontalement un peu au-dessus de la surface du liquide. On obtient une pulvérisation que l'on peut régler.

III. — CONCLUSIONS

En résumé, les alliages de cuivre et de zinc utilisés dans l'industrie contiennent de 55 0/0 à 100 0/0 de cuivre.

Ces alliages se divisent en deux classes bien distinctes :

1° Alliages contenant de 55 à 63 0/0 de cuivre formés de la solution α et de la solution β ou renfermant le composé CuZn ;

2° Alliages renfermant plus de 63 0/0 de cuivre formés de la solution α.

Les premiers sont susceptibles de se laminer à chaud.

Les seconds ne peuvent se laminer qu'à froid.

Le constituant β amène avec lui la dureté, et plus on abaissera le pourcentage en cuivre à partir de 63 0/0, plus le constituant β sera en quantité importante, plus aussi la dureté augmentera (à vitesse de refroidissement égale).

Il est bon de noter que l'industrie utilise, d'une part, des alliages contenant de 55 à 72 0/0 de cuivre (décolletage, planches, tubes, fils, etc...) ;

D'autre part, des alliages renfermant plus de 80 0/0 de cuivre.

Entre 73 et 80 0/0 de cuivre il n'y a guère d'alliages utilisés.

Les premiers Cu = 57 à 72 0/0 sont employés pour leurs propriétés mécaniques intéressantes, lesquelles proviennent soit de la présence du constituant β (Cu < 63 0/0), soit de la solution α assez riche en zinc.

Les seconds, qui trouvent leur principal débouché dans la fausse bijouterie, sont utilisés surtout pour leur couleur ; ils sont en effet formés de la solution α riche en cuivre qui rappelle ce dernier métal.

Il est à noter que les propriétés mécaniques de la solution α ne varient pas proportionnellement avec la teneur en zinc. La charge de rupture augmente bien lentement avec cette teneur. Mais les allongements passent par un maximum qui correspond à 30 0/0 de zinc.

D'autre part, il faut remarquer que c'est au moment où apparaît le constituant β (CuZn) que la charge de rupture augmente rapidement, tandis que les allongements diminuent très nettement.

Ceux-ci deviennent sensiblement nuls quand le corps α disparaît (Cu = 53) ou, du moins, quand la solution γ apparaît (Cu = 51). La charge de rupture passe par un maximum correspondant à peu près au moment où l'on a la solution β pure et décroît ensuite très rapidement.

IV. — TYPE DE CAHIERS DES CHARGES POUR CUIVRE ET LAITONS

TUYAUX EN CUIVRE SOUDÉS. — MARINE

MÉTAL	TOLÉRANCES	ESSAIS DE PRESSION	COLLERETTE	CINTRAGE
Cuivre = 9 de densité 0,004 matières étrangères	Sur longueur + 1 centimètre. Sur D int. $\pm 1/2^{mm}$ pour 50^{mm} et $\pm 1^{mm}$ pour 50 à 200^{mm} $\pm 2^{mm}$ pour > 200 Sur épaisseur ± 0,1 Sur épaisseur moyenne calculée par pesée ± 0,2.	$P = 800 \frac{E}{D}$	L = 0,6 du diamètre extérieur sans dépasser 30 millimètres. Le rayon de courbure raccordant la collerette et le tube ne dépassera pas l'épaisseur du tube. La collerette sera faite à la presse hydraulique ou au marteau à pilon, mais non à la main.	A 90° avec rayon = 4 fois diamètre extérieur, la soudure ayant la même courbure que l'axe.

CEINTURES EN CUIVRE

DÉSIGNATION	BARRES POUR CEINTURES	CEINTURES ARTILLERIE
Métal	Cuivre ne contenant pas plus de 0,005 de matières étrangères.	Cuivre contenant au plus 0,004 matières étrangères.
Tolérances	Sur longueur $\pm 1^{mm},5$; sur épaisseur et sur largeur $\pm 0^{mm},2$.	Indiquées dans des tables.
Essais de traction	»	R = 22 k. All = 33 0/0
Pliage	A bloc sans criques ni gerçures.	Ceintures rondes, pliage à bloc. — prismatique, — fissures tolérées aux arêtes. — conique, — jusqu'à contact du petit diamètre.
Retournement	»	Jusqu'à formation d'une boucle dont l'ouverture = 2 fois *e*.

TRÉFILÉS DE CUIVRE ET DE LAITON

<table>
<tr><th>DÉSIGNATION</th><th>NORD
FIL CUIVRE</th><th>NORD
FIL LAITON</th><th>ARTILLERIE
FIL CUIVRE</th><th>ARTILLERIE
FIL LAITON</th><th>MIDI
FIL LAITON</th><th>POSTES ET TÉLÉGRAPHES
FIL CUIVRE ROUGE H. C.
Haute conductibilité</th></tr>
<tr><td>Métal</td><td>»</td><td>70/30</td><td>0,004 mat. étrangères</td><td>Cu65 ± 1 } 1 0/0 mat.
Zn65 ± 1 } étrangères</td><td>»</td><td>Cuivre H. C.</td></tr>
<tr><td>Essais de traction</td><td>Résistance par millimètre carré / Allongement
Fil de | Moyen | Minima | Moyen | Minima
15/10 | 45 | 40 | 2 0/0 | 1
4mm | 40 | 36 | 3 | 2
5 | 35 | 30 | 5 | 4
6 | 30 | 25 | 6 | 5
11 | 25 | 20 | 15 | 12</td><td>Moyenne :
45 kilogr.
All. = 15 0/0

Minimum :
R = 40 kilog.
All. = 10 0/0</td><td>R = 22 kilog.
All. = 40 0/0
Fil de moins de 2 millim.
Pas d'essai de traction.</td><td>»</td><td>R = 30 à 56 kg.</td><td>Fil de
2mm | 2mm,5 | 3 | 3 1/2 | 4 | 4 1/2 | 5
44,6 | 43,8 | 42,5 | 41,57 | 40,6 | 39,62 | 34,19
de résistance par millim. carré
Allongement maximum 2 0/0</td></tr>
<tr><td>Pliages</td><td>5 pliages</td><td>5 pliages à 90°</td><td>»</td><td>»</td><td>»</td><td>Fil de
2mm | 2,5 | 3 | 3 1/2 | 4 | 4 1/2 | 5
Nombre de pliages
6 | 5 | 7 | 6 | 5 | 4 | 4</td></tr>
<tr><td>Divers</td><td>»</td><td>»</td><td>»</td><td>»</td><td colspan="1">Le fil enroulé sur un mandrin cylindrique de 15 millimètres de diamètre, les spires se touchant, devra recevoir un mandrin de 18 millimètres de diamètre minimum.
Expérience pour fil de 1mm,5
Pour le fil de 1 millimètre, même épreuve, mais sur mon mandrin de 10 millimètres porté à 12 millimètres.</td><td>»</td></tr>
<tr><td>Essais de résistance électrique</td><td>»</td><td>»</td><td>»</td><td>»</td><td>»</td><td>Fil de | 2mm | 2,5 | 3 | 3 1/2 | 4 | 4 1/2 | 5
Résistance électrique à 0° par kilomètre (ohms) | 5,3 | 3,39 | 2,36 | 1,73 | 1,33 | 1,05 | 0,85</td></tr>
</table>

BARRES DE LAITON

DÉSIGNATION	MARINE BARRES LAITON	MARINE BARRES MÉTAL NAVAL	ARTILLERIE BARRES LAITON A DÉCOLLETER
Métal	Métal contenant 2 0/0 de plomb et quelques millièmes d'étain.	Cu .... 62 0/0 Zn .... 37 0/0 Sn 1 0/0	Cu .... 60 à 62 Zn .... 37 à 40 Pb .... 1 à 1,5 matières étrangères < 0,2
Tolérances	± 3,10	— $0^{mm},5$ sur diamètre ± 5^{mm} sur la longueur	± 50^{mm} sur la longueur ± 0,2 sur le diamètre 0,0
Essais de traction	R = 30 kilog. All. = 40 0/0 avec compensation de 1 kilog. de R par 2 0/0 d'allongement et *vice versa* sans descendre au-dessous de : R = 28 kilog. All. = 36 0/0. Essais sur éprouvettes de : 100 L × 150^{mm2} S	R = 35 kilog. All. = 10 0/0 Toutefois un déficit de 3 kilog. sur R peut être compensé par un excès d'allongement de 3 0/0.	»
Essais divers	On prend les bouts de barre dont la longueur sera égale à 20 fois le calibre ou l'épaisseur, et on les enroulera à froid en forme d'anneau circulaire; il ne devra se manifester dans ce travail ni pailles, ni fentes, ni gerçures, ou autres défauts. On exécute sur quelques barres des soudures bout à bout.		Essais de décapage Les barres sont plongées dans un bain alcalin à 100°, puis décapées à l'acide nitrique; elles sont ensuite exposées à l'air pendant une heure ou deux. Cette opération ne devrait faire apparaître sur les barres ni criques, ni fentes, ni pailles.

LAITONS DE GUERRE

DÉSIGNATION	DOUBLAGES LAITONS MARINE	FLANS EN LAITONS RUELLE (MARINE)	FLANS EN LAITONS PUTEAUX (GUERRE)	BANDES LAITON MINISTÈRE DE LA GUERRE
Métal	70 0/0 de cuivre 30 0/0 de zinc	67 0/0 de cuivre 33 0/0 de zinc	67 0/0 de cuivre 33 0/0 de zinc Avec obligation d'employer les marques désignées et limite des déchets devant provenir de la Guerre à 40 0/0.	67 0/0 de cuivre 33 0/0 de zinc Avec obligation d'employer les marques admises. Déchets provenant de la Guerre avec maximum de 40 0/0 de l'alliage. Pas plus de 0,45 0/0 matières étrangères.
Tolérances	± 5 0/0 sur le poids de chaque feuille.	2/10 + en plus sur épaisseur, Diamètre > 300 + 1^{mm} — < 300 ± 1^{mm}	Diamètre { + 0^{mm},5 / — 0 Épaisseur { + 0^{mm},2 / — 0	Epaisseur de 3,95 à 4^{mm} Sur la largeur 1^{mm} La long. sera supérieure à 1^{m},30
Essais de traction		L'artillerie de marine prend comme minimum R = 30 kil. par mm² All = 58 0/0 A Ruelle, les essais de traction ne sont faits qu'à titre de renseignement et ne viennent qu'en 2e ligne après l'emboutissage.	R = 30,6 All = 62 0/0 15R + 6A > 855 Sur éprouvette de 100 long.	R = 30,6 All = 57 0/0 15R + 6A > 812 Sur longueur = 100^{mm}
Divers	Les feuilles à expérimenter seront en partie décapées à l'acide nitrique. Une autre partie sera frottée à la pierre ponce. Les surfaces examinées à la loupe ne doivent pas présenter de pailles, gerçures ou cendrures. Les feuilles doivent s'appliquer exactement sur surface plane.	Après emboutissage, il ne doit pas y avoir plus de 3 0/0 de rebut. Au-dessus de ce chiffre le rebut du lot peut être prononcé. On peut admettre jusqu'à 10 0/0 de rebut en faisant remplacer par le fournisseur les flans mauvais.	La fabrication est surveillée par des agents.	La plaque coulée aura au moins 20^{mm} d'épaisseur. Pour obtenir la bande, on donnera au moins trois laminages. Le poids de la masselotte sera au moins le 1/5 du poids total de la plaque.

PLANCHES DE LAITON

DÉSIGNATION	P.-L.-M.	ÉTAT	NORD	ÉTAT BELGE	MARINE	ARTILLERIE
Métal	Premier titre: 70 Cu ± 1 0/0 de l'alliage 30 Zn ± 1 0/0 — métaux étrang. 0,5 0/0 Les autres titres sont: 67/33 65/35 63/37	70 Cu ± 1 0/0 30 Zn ± 1 0/0	70 Cu 30 Zn 3 0/0 matières étrangères	»	70 Cu } 0,01 30 Zn } matières étran.	65 Cu ± 1 } 0,01 32 Zn ± 1 } mat. étran.
Tolérances	Pas mention au cahier des charges	Pas mention au cahier des charges	Pas de cahier des charges	»	Sur longueur et largeur ± 1/40 Sur poids: lorsque $e \leq 3^{mm}$ + 1/30 — $e > 2^{mm}$ + 1/20	Sur longueur: ± 2^{mm} pour L ≤ 2^{mm} 2^{mm} par mètre L > 2^{mm} Sur largeur: ± 2 millimètres Sur épaisseur: de $0^{mm},05$ à $0^{mm}.5$ suiv^{t} e
Essais par traction	Pas d'essai	Pas d'essai	R = moyenne 30 kilogr. pas moins de 25 kilogr. Al = moyenne 40 0/0, pas moins de 30 0/0 sur éprouvettes non recuites de 30^{mm} de largeur, à l'épaisseur de la planche: L = 101^{mm}	»	Pas d'essai	Pas d'essai

DÉSIGNATION	P.-L.-M.	ÉTAT	NORD	ÉTAT BELGE	MARINE	ARTILLERIE
Pliage	Pas d'essai	Pas d'essai	Bande de 40 à 50 de large et 250 L environ non recuite pliée complètement.	Pliage complet d'une bande	Pas d'essai	Pas d'essai
Emboutissage	Calotte sphérique de 100^{mm} de rayon et 120 de flèche.	Calotte sphérique de 100^{mm} de rayon, 120 de flèche.	Calotte sphérique à bord plat circulaire de 30^{mm} de largeur; corde 200^{mm} ; flèche 120^{mm}.	»	Calotte sphérique de 200 D, flèche 80^{mm} ; pour *e* de 3 à 5^{mm}.	Calotte sphérique de 200 D, flèche de 120.
Divers	»	»	»	»	Tube de 1, 5, 9^{cm} de D formé avec planches de 1, 2, 3^{mm} d'épaisseur.	»
Observations	»	»	»	»	Le poids des planches est calculé à raison de 8^{kg},446[1] par mm^2 de surface et par millimètre d'épaisseur.	»

1. Cette densité est trop faible, car elle est égale en réalité à environ 8,7.

TUBES EN LAITON SANS SOUDURES

DÉSIGNATION	P.-L.-M. TUBES POUR FUMÉE	ÉTAT TUBES POUR FUMÉE	ÉTAT BELGE TUBES POUR FUMÉE	MARINE POUR CONDENSEURS	MARINE POUR CHAUDIÈRES
Métal	Tolérance dans la proportion des métaux prévue est de : 70 Cu, 30 Zn } 1 0/0 du poids de l'alliage. Métaux étrangers : 0,5 0/0 de l'alliage.	70 Cu ± 1 0/0 30 Zn ± 1 0/0	70 cuivre 30 zinc Tolérances de 2 0/0 en plus ou en moins.	70 0/0 de cuivre au moins. Pas plus de 0,007 de plomb.	Minimum 68 0/0 de cuivre, pas plus de 0,007 de plomb.
Tolérances	»	Aucune sur dimensions. 3 0/0 sur poids.	Sur diamètre : 0,01 du diamètre. Sur épaisseur : 0,1 d'épaisseur.	Sur L = ± 1mm Sur D ext — 0mm,2 Sur *e* ± 0mm,1 Sur poids { + 1/15e, — 1/30e (Calculé avec 8,5 densité).	Sur L = + 2mm Sur D ext = — 1/4mm Sur *e* ± 1/5mm Sur poids : 1/20e. (Densité = 8,5)
Essais de traction Rupture à la presse hydraulique	»	»	»	20 kilogr. par mm².	24 kilogr. par mm².
Essai de pression	20 kilogr. par 2 centimètres pendant 1 minute.	20 kil. par cm² pendant 1 minute.	8 atmosphères.	10 kilogr. par cm².	30 kilogr. par cm².
Rabattement de collerette	A froid de 15mm large.	De 15mm de large.	»	Largeur 1/10e de diamètre.	Largeur = 1/10e de diamètre.
Retournement	Un bout de 200mm de long est scié suivant génératrice et retourné complètement.	Retournement d'un bout de 100mm.	»	»	»

DÉSIGNATION	P.-L.-M. TUBES POUR FUMÉE	ÉTATS TUBES POUR FUMÉE	ÉTAT BELGE TUBES POUR FUMÉE	MARINE POUR CONDENSEURS	MARINE POUR CHAUDIÈRES
Renflement	»	»	Mandrinage à froid après recuit jusqu'à augmentation du diamètre de 10 0/0.	Renflement à un diamètre supérieur de 1/10ᵉ de celui du tube et sur une longueur = 1 fois 1/2 le diamètre.	Renflement à un diamètre supérieur de 1/10ᵉ de celui du tube et sur une longueur = 1 fois 1/2 le diamètre.
Cintrage	Bout de 700mm recuit et rempli de brai est plié jusqu'à ce que les extrémités se rejoignent.	Bout de 700mm recuit et rempli de brai est plié à froid complètement.	»	»	»
Flexion	Un bout de 700mm non recuit rempli de brai et placé entre deux appuis distants de 500mm est pressé à son milieu jusqu'à une flèche de 80mm.	Un bout de 700mm non recuit rempli de brai et placé entre 2 appuis distants de 500mm est pressé à son milieu jusqu'à une flèche de 80mm.	»	»	»

CHEMINS DE FER DE PARIS A LYON ET A LA MÉDITERRANÉE

NUMÉRO du TITRE	COMPOSITION			APPLICATIONS	TOLÉRANCES
	CUIVRE	ÉTAIN	ZINC		
				Laitons	
1	70	»	30	Tuyaux, plaques en feuilles, robinets.	Il est accordé pour la proportion de chacun des métaux prévus pour l'alliage une tolérance en plus ou en moins de 1 0/0 du poids de l'alliage. On pourra admettre 2 0/0 de plomb en remplacement de 2 0/0 de zinc pour les titres 3 ou 4. Le poids total des métaux autres que ceux prévus pour l'alliage ne doit pas dépasser 1/2 0/0 du poids de l'alliage.
2	67	»	33	Sièges de colonnes de sifflets, cercles de lunettes, talons de fermes de foyers, cadres pour plaques de numérotage, etc.	
3	65	»	35	Poignées et contre-poignées, loqueteaux et supports de loqueteaux, charnières et recouvrements de charnières de portières, etc.	
4	63	»	37	Rondelles diverses, gaines de plaques de compartiments coulants de glaces, etc.	
5	60 à 65	»	30 à 35	Vis à métaux.	
				Soudures au cuivre	Le poids total des métaux autres que ceux prévus pour l'alliage ne doit pas dépasser 5 0/0 du poids de l'alliage.
1	72,25	1,25	26,50	Soudures de fer sur fer en général.	
2	60	»	40	Soudures de fer sur cuivre et sur bronze et de cuivre sur cuivre et sur bronze.	
3	54,25	2	43,75	Soudures de cuivre sur laiton et de laiton sur laiton.	

CHEMINS DE FER DU NORD

NUMÉRO DE L'ALLIAGE	COMPOSITION DE L'ALLIAGE			APPLICATIONS
	CUIVRE	ZINC	ÉTAIN	
4	70	»	30	**Pièces en laiton** Valves et têtes d'échappement; supports d'armatures de ciel de foyers; tubes à air chaud, siège de chapelles d'entrées d'eau; corps de balances, supports et ornements divers; collerettes de soupapes de sûreté, rondelles d'interposition pour tampons et crochets de traction; plaques indicatrices des numéros de machines; volants de petit diamètre dont le moyeu n'est pas fileté; boites à clapets; plaques pour inscriptions des noms de mécaniciens; échelles indicatrices des crans de changement de marche; collerettes pour colonnes de vis de freins; raccords des cheminées des éjecteurs; couronnes de lunettes d'écran; thermo-siphons; cadres à couronne de lunettes d'écran; jets creux et pleins.
5	90	»	10	Laiton brasable, brides et raccords de tuyaux; raccords coniques de prise de vapeur intérieure. Jets.

La proportion de matières étrangères ne devra jamais dépasser les 0,02 du poids total.

La proportion de cuivre ne devra pas varier de plus de 0,01 en plus ou en moins de la proportion indiquée.

CHEMINS DE FER DE L'ÉTAT

DÉSIGNATION DE L'ALLIAGE	NUMERO DU TITRE	QUANTITÉS DE MÉTAUX DIVERS POUR 100 D'ALLIAGE					
		CUIVRE rouge	ÉTAIN	ZINC	PLOMB	ANTIMOINE	NICKEL
Laiton......	1	70	»	30	»	»	»
—	2	67	»	33	»	»	»
—	3	65	»	35	»	»	»
—	4	63	»	37	»	»	»

CHEMINS DE FER DU MIDI

SPÉCIFICATION TECHNIQUE POUR LA FOURNITURE DE PIÈCES BRUTES MOULÉES EN LAITON

Fabrication. — Les pièces brutes en laiton seront moulées avec tous les soins apportés dans les meilleurs ateliers aux travaux de ce genre.

Elles seront exemptes de soufflures, dartres, gouttes froides, reprises et en général de tous défauts quelconques pouvant nuire à leur solidité ou à leur durée.

Elles seront soigneusement ébarbées et nettoyées après leur coulée.

Chaque pièce portera la marque du fournisseur.

Toutes les pièces en laiton auront la composition suivante :

Cuivre rouge............	70
Zinc....................	30

Les métaux entrant dans la composition des divers alliages de laiton seront de première qualité et exempts d'impuretés.

Ces métaux devront, pour toutes les pièces, être parfaitement alliés entre eux de manière que la composition soit constante dans toutes les parties d'une même pièce et que la texture soit bien homogène.

Les tolérances concernant les métaux étrangers et les impuretés sont des maxima qui ne devront être dépassés dans aucun cas.

Il est accordé, d'autre part, pour les compositions des divers alliages précités, les tolérances suivantes en ce qui concerne le cuivre, l'étain et le zinc.

Pour les pièces en laiton : sur le zinc et sur le cuivre, 2 0/0 en plus ou en moins du poids de l'alliage avec liberté pour le fournisseur de remplacer 2 0/0 de zinc par 2 0/0 de plomb.

Les métaux autres que le plomb ne doivent pas atteindre, pour le laiton, une proportion supérieure à 1/2 0/0 du poids de l'alliage.

CHEMINS DE FER DE L'EST

L'alliage employé pour la fabrication des pièces en laiton sera composé de :

Cuivre	68
Zinc	32
	100

ARTILLERIE

Composition de l'alliage. — L'alliage employé dans la fabrication des pièces en laiton coulé a la composition précédemment indiquée pour les feuilles, barres et fils en laiton.

Le laiton étampé a la composition suivante :

Cuivre	60 ± 1	101
Zinc	40 ± 1	
Plomb	$1 \pm 0,5$	

avec une tolérance de 1/100 de métaux étrangers.

Toutes les prescriptions faites relativement à la réception et à l'emballage des pièces en cuivre sont applicables aux pièces en laiton.

ÉCOLE CENTRALE DE PYROTECHNIE MILITAIRE

INSTRUCTION PROVISOIRE POUR LA FOURNITURE DU FIL DE LAITON AU DOSAGE DE 90/10, EN COURONNES

(APPROUVÉE LE 5 MAI 1900)

ARTICLE I

CONDITIONS GÉNÉRALES

1. **Titre du laiton.** — Le laiton sera composé, en poids, de :

Cuivre	90 parties
Zinc	10 —

avec une tolérance qui pourra atteindre 1 en plus ou 1 en moins sur chacun des métaux composants.

2. **Matières.** — Les matières pouvant être employées pour la fabrication sont les suivantes :

1° Les cuivres et les zincs neufs, sans distinction de marque;

2° Des déchets en proportion indéterminée.

Les seuls déchets autorisés seront ceux qui proviendront de la fabrication même du laiton faisant l'objet de la fourniture en cours, ou de fourniture de même espèce, et les déchets dits de première catégorie de laiton à cartouches.

Comme garantie de pureté, l'analyse du métal livré ne devra pas révéler *plus de* 0,50 0/0 *de matières étrangères.*

Cette analyse sera effectuée au laboratoire de l'École de pyrotechnie sur les barreaux qui auront servi aux épreuves de traction.

Si l'analyse à l'École de pyrotechnie motive le refus d'un lot et si le fournisseur en conteste les résultats, un échantillon prélevé sur les mêmes barreaux sera analysé à la section technique de l'Artillerie, à fin de contre-épreuve.

3. **Dimensions.** — Le diamètre des fils de laiton sera compris entre $7^{mm},32$ et $7^{mm},36$.

En principe, le fil de laiton sera livré en couronnes d'un seul brin chacune d'un poids individuel supérieur à 10 kilogrammes ; cependant toute livraison pourra comprendre jusqu'à 5 0/0 de son poids inférieur à 10 kilogrammes, mais supérieur à 5 kilogrammes.

Le tambour enrouleur des couronnes aura 45 centimètres de diamètre.

4. **État du métal.** — *A*. Le métal sera recuit, décapé et lavé après la dernière passe de tréfilage.

Sa surface devra être exempte d'oxydes, régulière, sans rayures, pailles, criques, etc.

Les sections du fil ne relèveront ni pailles, ni doublures.

Les extrémités des fils seront nettes, exemptes de bavures.

B. La résistance à la traction mesurée sur des tronçons de fil de 100 millimètres de longueur entre repères devra être supérieure à 25 kilogrammes par millimètre carré de section ; l'allongement devra être supérieur à 42 0/0.

ARTICLE II

RÉCEPTION DES PRODUITS. — ESSAIS DE TRACTION

1. **Réception des produits.** — *A*. Dans l'usine. — La réception à l'usine sera faite par un contrôleur du service des Forges, qui opérera de la manière suivante :

1° *Visite des surfaces*. — Prélever au hasard 20 couronnes par livraison de 500 kilogrammes et visiter sur chacune d'elles deux régions de 50 centimètres de longueur, prises au hasard et limitées à leurs extrémités par deux traits à la craie.

Noter les nombres :

A. De défauts graves ;

B. De défauts moyens ;

C. De défauts légers.

L'appréciation de l'importance de ces défauts sera faite par comparaison avec un tableau type fourni par l'École de pyrotechnie.

Si la somme $A + \frac{b}{2} + \frac{c}{4}$ est inférieure ou égale à 5, la livraison subira les vérifications suivantes qui sont celles des dimensions et celles des surfaces de chaque couronne.

Dans le cas contraire, la livraison sera rendue à l'industriel qui pourra la remanier, enlever les couronnes défectueuses et la représenter au contrôleur.

2° *Vérification des dimensions*. — Le contrôleur s'assurera que l'enroulage a bien été effectué sur un tampon de 45 centimètres de diamètre, puis passera à l'opération du calibrage.

Toutes les couronnes, sans exception, seront calibrées aux deux extrémités et en dix points appartenant à des spires différentes et, autant que possible, également espacées d'une extrémité à l'autre ; toute couronne présentant un seul diamètre non compris dans les tolérances sera rendue à l'industriel ; sera aussi rendue à l'industriel toute couronne sur laquelle en cours de l'opération du calibrage, on constatera un ou plusieurs défauts graves à la surface.

Pour cette vérification des diamètres, le contrôleur emploiera un calibre du modèle en usage pour la vérification des bandes de laiton en cartouches. Ce calibre et ses cales de réglage de $7^{mm},32$ et de $7^{mm},36$ lui

seront fournis et remplacés par la section technique sur la demande du sous-directeur des Forges dont dépend le contrôleur intéressé.

B. Dans les établissements de l'artillerie. — Dès qu'une livraison de 5.000 kilogrammes sera parvenue à l'établissement destinataire, cet établissement découpera au hasard vingt bouts de couronnes de 200 millimètres de longueur.

Les barreaux ainsi obtenus porteront à l'une de leurs extrémités la marque du fournisseur et le numéro du lot, à l'autre extrémité un numéro d'ordre de 1 à 20 et la marque de l'établissement.

Les dix barreaux que l'établissement jugera comme étant les plus défectueux seront adressés à l'École de pyrotechnie ; les dix autres seront conservés par l'établissement.

2. **Essais de traction.** — Les 10 barreaux adressés à l'École de pyrotechnie y seront soumis aux épreuves de traction.

La charge par millimètre carré de section devra être supérieure à 25 kilogrammes.

L'allongement correspondant à un intervalle de 100 millimètres entre repères devra être supérieur à 42 0/0.

Si deux barreaux donnent des résultats insuffisants, le lot sera refusé sans contre-épreuve.

Si un barreau donne des résultats insuffisants, il sera procédé à une contre-épreuve.

Celle-ci portera sur les 10 barreaux restant à l'établissement destinataire qui seront alors adressés à l'Ecole de pyrotechnie.

A cette contre-épreuve, tous les barreaux devront subir avec succès les essais de traction.

Toutefois, un défaut d'allongement sur un seul barreau imputable à un défaut local, et non à une insuffisance de recuit, n'entraînera pas le refus de la livraison.

ARTICLE III

MARQUES. — LIVRAISONS. — EXPÉDITIONS. — PROCÈS-VERBAUX

1. Les livraisons seront exclusivement composées de couronnes.

Toutes les couronnes porteront à chacune de leurs extrémités la marque du fournisseur et le numéro de la livraison; à l'une des extrémités seulement le poinçon du contrôleur.

2. Chaque livraison sera du poids de 5.000 kilogrammes, sauf la dernière qui pourra être d'un poids moindre, mais qui sera traitée, au point de vue des essais, comme une livraison de 5.000 kilogrammes.

Le métal sera rendu franco dans les magasins de l'établissement désigné.

En principe, le métal sera expédié en caisses ou en tonneaux portant la marque du fournisseur et le numéro de la livraison. Toutefois, pour les établissements qui seraient reliés aux gares de chemins de fer par un service régulier sur voie normale, il pourra être spécifié, à un moment

quelconque, avant ou pendant le cours des livraisons, au choix des établissements, que les expéditions seront faites par wagon complet, fermé.

Dans ce cas, l'engerbement des couronnes, en vrac, devra être fait de manière à éviter leur déformation ou leur souillure par des corps étrangers.

Le mode d'expédition en vrac pourra, de même, être interrompu à un moment quelconque, au choix des établissements destinataires, pour être remplacé par le mode d'expédition en caisses ou en tonneaux.

3. Les frais de transport et d'emballage seront à la charge du fournisseur, ainsi que les frais de retour des caisses vides, des tonneaux vides et des livraisons refusées.

4. Dès qu'une livraison sera expédiée, le fournisseur enverra un avis d'expédition à l'établissement destinataire.

5. Dès que les essais de traction auront été effectués, l'École de pyrotechnie fera connaître en même temps à l'établissement intéressé, au fournisseur et au service des Forges, si la livraison est *reçue* ou *refusée*, ainsi que le motif du refus, s'il y a lieu.

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE IX

I. — ÉTUDE THÉORIQUE

Baker, *Philosoph. Transactions*, 196-529 (*Chaleur de formation*).

Behrens, *Das Mikroskopische Gefüge der Metalle und Legierungen*.

Charpy, *Bulletin de la Société d'Encouragement; — Contribution à l'étude des Alliages Métalliques* (*Micrographie*).

Guillemin, *Commission des Méthodes d'essais*, 1894 (*Id.*).

Herschkowitsch, *Zeitschrift für physikalische Chemie*, t. XXVII, p. 123 1898 (*Force électromotrice et chaleur de formation*).

H. Le Chatelier, *Technique de la Métallographie microscopique; — Contribution à l'étude des Alliages métalliques*, p. 421 (*Micrographie*).

Roberts-Austen et Stansfield, *Proc. Inst. Mech. Engineers*, février 1897 (*Points de transformation*).

Shepherd, *Journ. of the Physical Chemistry*, juin 1904, p. 421 (*Diagramme Micrographie, Propriétés*).

II. — ÉTUDE INDUSTRIELLE

1° OUVRAGES GÉNÉRAUX

Hiorns, *les Alliages métalliques* (Traduction Boudouard), Steinheil, éditeur, p. 162 à 243 (*Généralités*).

Knab, *Traité des Alliages métalliques*, Steinheil, éditeur, p. 31 à 224 (*Généralités*).

Krupp, *Die Legierungen*, Vienne, 1894, p. 144 (*Id.*).

Ledebur, *les Alliages métalliques, leurs emplois dans l'industrie*, Fritsch, 1894 (*Id.*).

Thurston, *Alloys Brasses and Bronzes*, John Willey and Sons, éditeur, New-York, 1903 (*Id.*).

2° MÉMOIRES PARTICULIERS

Bolley, *Essais et recherches chimiques*, Paris, 1869 (*Propriétés*).

Charpy, *Bulletin de la Société d'Encouragement; — Contribution à l'étude des Alliages* (*Propriétés et traitements*).

Calvert et Johnson, *Philos. Magazine*, 1850, 1858, 1859 (*Propriétés*).

Commission des États-Unis, *Rapport spécial* (*Id.*).

Crookenvitt, *Erd'manns Journal*, XLV, 1848, Paris (*Id.*).

Guillet, *Génie civil*, t. XLVII, n° 9, 1905 (*Fabrication*); — *Revue de Métallurgie*, février 1905 (*Micrographie*).

Le Chatelier (A.), *Mémorial du Génie maritime*, 1890 (*Propriétés*); — *Revue générale des Sciences*, 16 août 1891 (*Id.*); — *Comptes Rendus*, 31 mars 1890 (*Recuit*).

Mallet, *Philos. Magazine*, 1842 (*Propriétés*).

Matthiesen, *Philos. Transactions*, 1860-1864 (*Id.*).

Riche, *Annales de Chimie et de Physique*, 1873 (*Id.*).

Tréba, *Génie civil*, 1897 (*Procédé Dyck*).

Wiedermann, *Poggendorff's Annalen*, 1859 (*Propriétés*).

CHAPITRE X

ALLIAGES DE CUIVRE. — LAITONS SPÉCIAUX

Nous appellerons laiton spécial un alliage formé de cuivre et de zinc et renfermant un ou plusieurs autres corps, mis intentionnellement pour obtenir des propriétés particulières.

Les principaux laitons spéciaux sont :

1° Les laitons au plomb ;
2° Les laitons à l'étain ;
3° Les laitons à l'aluminium ;
4° Les laitons au manganèse ;
5° Les laitons au fer ;
6° Les laitons au vanadium ;
7° Les laitons au phosphore ;
8° Les laitons au silicium ;
9° Les laitons complexes qui sont les plus usités.

Au cours de ce chapitre nous donnerons les résultats des recherches que nous avons faites sur un grand nombre de laitons spéciaux. Nous préciserons de suite les conditions dans lesquelles elles ont été faites ; elles comportent, comme nos recherches sur les aciers spéciaux, des essais micrographiques et des essais mécaniques. Les deux séries d'essais ont porté sur des barres brutes de coulée et sur des barres laminées-étirées, puis recuites de façon à faire disparaître tout l'écrouissage. Ceci est très important à noter. Il est, en effet, de toute

évidence que, lorsque l'on veut se rendre compte du rôle joué par un élément, il est nécessaire d'amener les alliages considérés sous un même état. Or l'état recuit est beaucoup plus aisé à définir qu'un état quelconque d'écrouissage. Les essais sur barres laminées et recuites ont été faits sur des échantillons préparés aux usines métallurgiques de La Bonneville (Eure).

Les barres brutes de coulée ont été obtenues en coulant un cylindre de 80 millimètres de diamètre sur lequel venaient les barrettes, ceci de façon à ce qu'elles soient parfaitement saines.

LAITONS AU PLOMB

Étude théorique (Album, Pl. LVII, Phot. 225 à 228). — Nous avons déjà fait remarquer, à propos des laitons ordinaires de décolletage, que ces alliages n'étaient généralement pas composés purement de cuivre et de zinc, mais qu'ils renfermaient également de 0,5 à 3 0/0 de plomb.

Le plomb n'intervient-il là que pour abaisser le prix de revient? Nullement, on sait depuis fort longtemps que le plomb facilite le travail au tour du laiton.

L'étude micrographique que nous avons faite des laitons au plomb sur des échantillons préparés aux usines de La Bonneville montre très nettement qu'en substituant au cuivre de plus en plus de plomb, ce métal, ne s'alliant pas, subdivise de plus en plus les cristaux.

L'effet du plomb est donc de diminuer l'importance et le nombre des cristaux arrondis (Pl. LVII, Phot. 225 à 227).

On conçoit alors aisément que le plomb facilite le tournage du laiton et permette même de mieux travailler le métal au laminage.

Mais le plomb, lorsqu'il se trouve en trop importantes quantités, produit, comme dans tous les alliages, une liquation très nette, qui fait que le métal n'est plus homogène.

On peut, dans les laitons, ajouter jusqu'à 6 à 8 0/0 de plomb, sans avoir cet inconvénient. Mais la cassure du métal devient

d'un gris terne ; le grain est extrêmement serré et tenu. Toutefois, le métal travaillé est d'un beau jaune, plus doré même que le laiton à 60 de cuivre et 40 de zinc ne contenant pas de plomb.

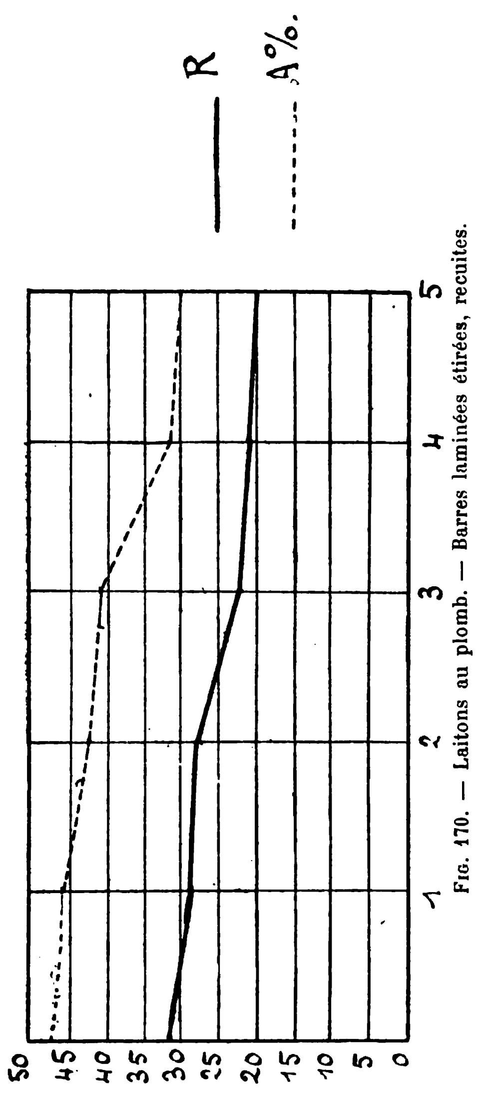


Fig. 170. — Laitons au plomb. — Barres laminées étirées, recuites.

Lorsqu'on ajoute plus de 5 0/0 de plomb, il y a ségrégation de plomb, le métal n'est pas homogène ; il est difficile à travailler ; si on le lamine à chaud, il arrive fort souvent que, suivant l'expression d'atelier, le métal *ressue :* au moment où agit la pression du laminoir, on voit couler du plomb liquide.

On peut, toutefois, avec soin laminer et travailler des laitons renfermant jusqu'à 7 0/0 de plomb.

Au delà, le plomb se rassemble dans la coulée au fond de la lingotière et, au laminage à chaud, donne lieu à une véritable pluie de plomb fondu.

Étude industrielle. — Fabrication. — La préparation des laitons au plomb ne présente aucune particularité. Le plomb

est ajouté, lorsque le creuset est encore dans le four et quelques instants avant la coulée.

Le métal est mélangé avec soin.

Le plomb, nous l'avons dit, facilite le travail à chaud.

Propriétés. — Nous avons déterminé les propriétés mécaniques des laitons au plomb, et voici les résultats que nous avons obtenus (*fig.* 170 et 171).

I. — SUR BARRES LAMINÉES, ÉTIRÉES ET RECUITES

COMPOSITION			PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES					
Cu	Zn	Pb	R	E	A 0/0	Σ	CHOC [1]	DURETÉ [2]
59,50	39,70	0,85	29,9	12,1	45,5	56,8	8	60
58,45	39,35	1,90	27,3	11,5	43,4	41,2	7	68
57,85	38,85	3,05	22,2	10,8	41,1	38,3	4	62
56,15	40,05	4,02	20,3	9,7	31,9	37,0	3	60
54,85	39,25	5,15	20,0	9,8	30,2	35,2	3	60

1. Par la méthode Frémont sur barrettes *entaillées*.
2. Par la méthode Brinell sous une pression de 1.000 kilogrammes.

II. — SUR BARRES COULÉES

COMPOSITION			PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES					
Cu	Zn par différence	Pb	R	E	A 0/0	Σ	CHOC	DURETÉ
				1re *série*				
60,0	40	0	31,9	8,1	4,7	59,6	12	56
59,5	40	0,5	32,1	8,3	33,5	33	7	57
69,0	39,8	1,2	27,9	8,3	14,9	18,5	6	52
60,1	37,2	2,1	30,2	8,1	12,5	16	6	59
53,9	39,1	3,0	29,2	9,8	12,5	10	5	69
				2e *série*				
70,4	29,6	0	13,7	5,7	68	50	11	30,6
69,1	30,2	0,7	16,4	5,8	42	42	8	32
67,9	30,8	1,3	18,9	4,8	51	51	9	31,5
69,3	29,1	2,6	20,6	6,0	54	54	5	31
67,2	29,6	3,2	13,5	4,0	52	32	6	32

Des résultats obtenus on peut déduire que le plomb :

1° Diminue peu à peu la charge de rupture dans les laitons du type Cu = 60 et du type Cu = 70;

2° La limite d'élasticité suit la même règle ;

3° Le plomb diminue notablement les allongements et les strictions, surtout dans les laitons du type Cu = 60 ;

4° Il apporte de la fragilité ;

5° Il ne change pas sensiblement la dureté du métal, du moins telle qu'elle est définie par le chiffre de Brinell.

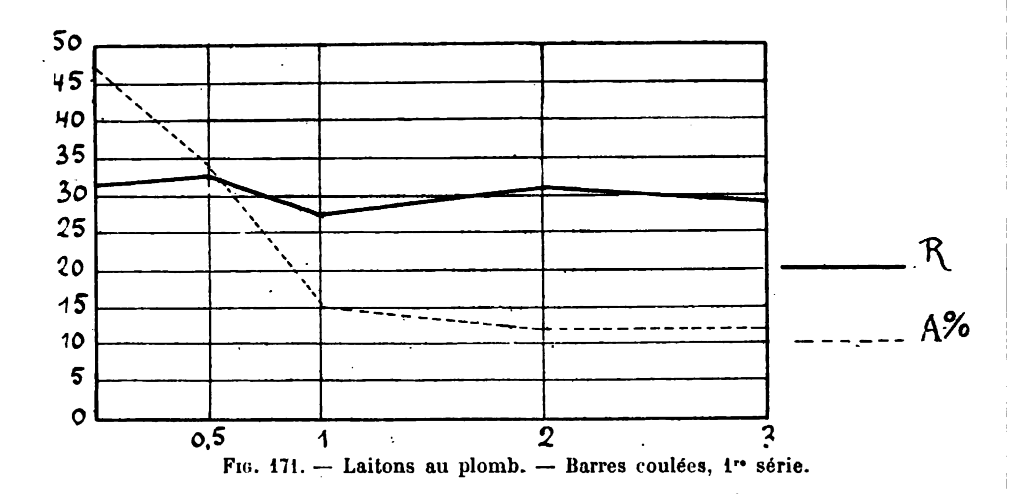


Fig. 171. — Laitons au plomb. — Barres coulées, 1re série.

En résumé, le plomb nuit très nettement aux propriétés mécaniques, du moins lorsqu'il dépasse 3 0/0.

Utilisations. — Étant donné l'influence du plomb sur les propriétés mécaniques du laiton, les laitons au plomb ne peuvent être employés que dans la préparation de pièces soumises à un faible travail.

C'est le cas d'un grand nombre d'objets obtenus par décolletage.

La présence du plomb, nous le répétons, aura pour effet de faciliter le tournage, ce qui se trouve nettement démontré par la micrographie.

Toutefois, dans les laitons à haute résistance on peut

admettre que 0,3 à 0,5 0/0 de plomb ne peut être nuisible. Il est donc inutile d'employer les zincs extra-purs.

LAITONS A L'ÉTAIN

Étude théorique (Album, Pl. LVIII, Phot. 229 à 232). — Les laitons à l'étain sont fort employés, depuis quelque temps, dans les constructions navales ; nous en verrons tout à l'heure la raison.

Nous avons fait quelques essais en les restreignant toutefois à l'influence de l'étain sur le laiton du type courant de décolletage, c'est-à-dire 60 0/0 cuivre, 40 0/0 zinc.

Et nous avons vu par l'étude micrographique que l'étain joue le même rôle que le zinc, mais avec une activité beaucoup plus grande ; on peut dire que 1 0/0 d'étain équivaut à 1,5 0/0 de zinc.

Parmi les micrographies que nous donnons, nous ferons remarquer l'une d'elles, qui représente l'alliage à 54 0/0 de cuivre et 6 0/0 d'étain ; une autre donne la structure d'un alliage à 60 0/0 de cuivre et 10 0/0 d'étain.

Cet alliage a même structure que le précédent, bien qu'il renferme beaucoup plus de cuivre ; mais il contient plus d'étain.

Tous deux accusent une microstructure d'alliages cuivre-zinc renfermant aux environs de 5 0/0 de zinc[1].

Étude industrielle. — Fabrication. — Cette opération ne demande aucun soin particulier.

Comme le plomb, l'étain est ajouté au moment de la coulée, un peu avant de sortir le creuset du four.

Propriétés. — Les laitons à 60 0/0 de cuivre contenant plus de 4 0/0 d'étain ne sont plus susceptibles d'être utilisés ; ils sont extrêmement fragiles, possèdent une cassure à très gros grains, d'un gris d'argent.

1. Poursuivant notre étude sur les laitons spéciaux, nous nous sommes aperçu que nous avons commis une erreur : l'étain forme pour un pourcentage assez élevé un composé spécial, rappelant Cu^4Sn, dont l'importance dépend de la teneur en étain.

Voici, d'ailleurs, les résultats des essais mécaniques sur barres laminées, étirées, puis recuites (l'étain est substitué au cuivre) (*fig.* 172) :

COMPOSITION			PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES					
Cu	Zn	Sn	R	E	A 0/0	Σ	CHOC	DURETÉ
59,42	39,67	0,72	34,0	11,3	40	49,5	13	67
59,35	38,89	1,29	34,3	12,5	35	39,2	7	74
60,03	37,62	2,22	35,9	14,2	13	12,7	0	77

Ces résultats montrent que l'étain :

1° Augmente un peu la charge de rupture ;

2° Augmente un peu la limite élastique ;

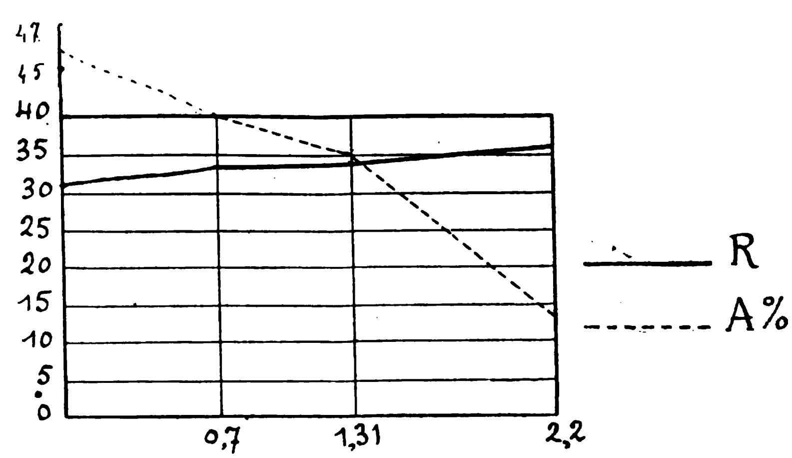


Fig. 172. — Laitons à l'étain. — Barres laminées, étirées et recuites.

3° Diminue très rapidement les allongements et les strictions, dès qu'il dépasse 1 0/0 ;

4° Amène une fragilité énorme, pour les mêmes proportions ;

5° Augmente la dureté.

Ces résultats sont en complète concordance avec la micrographie ; les propriétés de ces laitons sont bien, en effet, celles de laitons à teneur en cuivre, plus faible que leur pourcentage réel.

De ceci il découle donc que l'étain est un métal que l'on ne doit pas introduire dans les laitons en quantité trop importante. D'ailleurs, pour qu'un laiton soit forgeable à chaud, on ne peut dépasser 2,5 avec 60 0/0 de cuivre.

L'étain, en dehors de l'augmentation de la charge de rupture et de la limite élastique, a une propriété remarquable.

Il résulte d'expériences nombreuses, que nous décrivons dans un paragraphe spécial à la fin de ce chapitre, que les laitons à l'étain offrent le maximum de garantie au point de vue de la résistance à l'eau de mer.

Utilisations. — Les laitons à l'étain trouvent leur débouché dans les constructions navales, dans la fabrication des pompes, etc.

La composition généralement adoptée est la suivante :

Cuivre	60 à 62 0/0
Étain	1 à 1,5 0/0
Zinc	39 à 37,5 0/0

C'est cet alliage qui est vendu sous le nom de laiton Iton (Société Métallurgique de La Bonneville), métal Naval (usines anglaises et Société électrométallurgique française), bronze Laveyssière (Compagnie française des Métaux), etc...

LAITONS AU MANGANÈSE

Étude théorique (Album, Pl. LIX et LX, Phot. 233 à 240). — M. Guillemin a publié, dans la note que nous avons souvent citée, plusieurs micrographies de laitons au manganèse; bien que les analyses n'accompagnent pas les micrographies et

que les métaux soient simplement désignés sous le nom de tendres, mi-durs, durs et extra-durs, on reconnaît bien les microstructures des laitons ordinaires.

Nous avons repris l'étude des laitons au manganèse, tant au point de vue micrographique que mécanique.

La micrographie de ces alliages est identique à celle des laitons ordinaires (Pl. LIX et LX, Phot. 233 à 240). Nous citerons notamment l'exemple du laiton renfermant :

Cu............................	54
Zn............................	40
Mn............................	6

qui a sensiblement même structure que le laiton :

Cu............................	57
Zn............................	43

Il semble donc que le manganèse se substitue au cuivre, 1 0/0 de manganèse jouant le même rôle que 0,50/0 de cuivre.

Les essais pratiqués sur des laitons du type :

Cu............................	70
Zn............................	30

dans lesquels on a remplacé partie du cuivre par du manganèse, ont conduit aux mêmes conclusions.

D'ailleurs, pour voir si cette substitution était bien réelle, nous avons examiné des laitons ayant pour composition :

1°	Cu............................	45
	Mn............................	10
	Zn............................	45
2°	Cu............................	55
	Mn............................	10
	Zn............................	35

et nous leur avons trouvé même structure que s'ils avaient eu pour composition :

1°	Cu	50
	Zn	50
2°	Cu	60
	Zn	40

Étude industrielle. — Fabrication. — Les premiers échan-

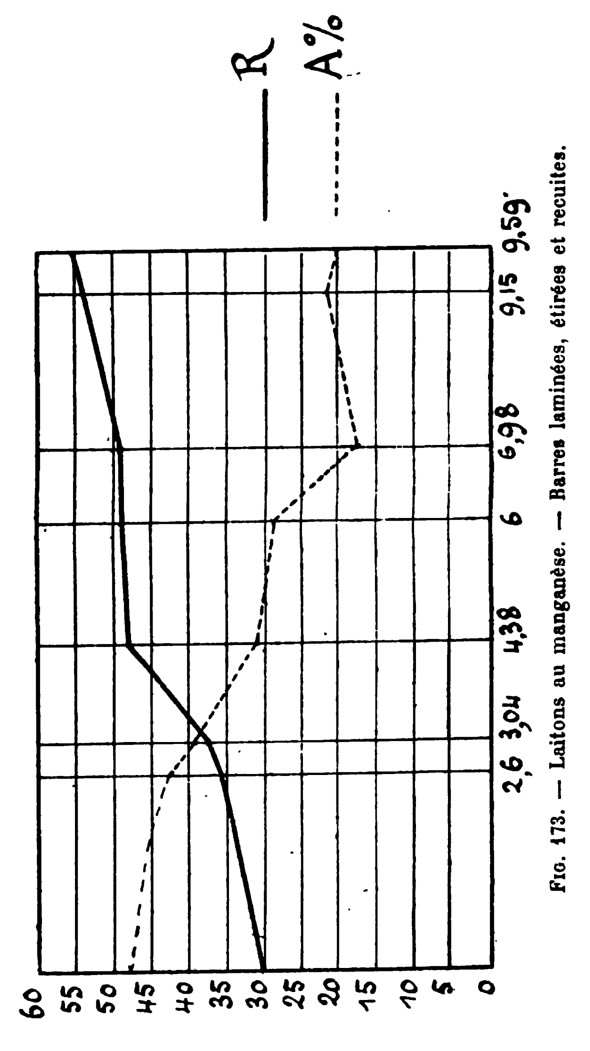


Fig. 173. — Laitons au manganèse. — Barres laminées, étirées et recuites.

tillons de laitons au manganèse ont été obtenus par Stirling et

Parkes en réduisant l'oxyde de manganèse par le charbon en présence de cuivre et en ajoutant ensuite du zinc.

En 1876, Parsons, qui est le premier à avoir étudié sérieusement ces alliages, ajouta à du cuivre du ferromanganèse déjà employé en sidérurgie et utilisa le ferro-cupro-manganèse comme matière première dans la préparation des laitons et bronzes au manganèse.

A l'heure actuelle, on utilise partout le cupro-manganèse,

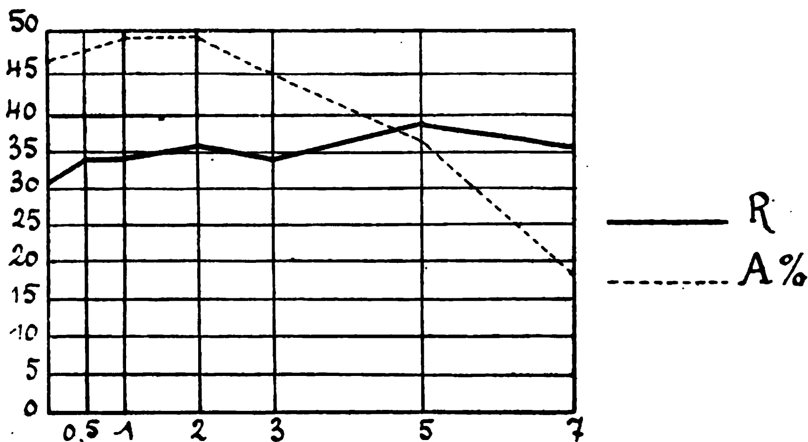


Fig. 174. — Laitons au manganèse, 1er type. — Barres brutes de coulée.

alliage de cuivre et de manganèse, dont nous étudierons la fabrication au chapitre xii.

Ce cupro-manganèse est ajouté en quantité convenable dans l'alliage déjà fondu, un peu avant la coulée. Si la proportion à mettre est grande, on en fondra la plus grande quantité lorsque le creuset est encore dans le four; mais généralement on en réservera quelque peu pour être jeté dans le creuset au moment même de la coulée.

Il ne faut pas oublier que le manganèse joue dans la fabrication des laitons un double rôle :

1° C'est un désoxydant, qui détruira les oxydes contenus dans le bain ;

2° Il apporte avec lui — lorsqu'il est mis en excès — des propriétés mécaniques spéciales que nous allons étudier.

Propriétés. — Nous donnerons d'abord les résultats que nous avons obtenus :

1° Sur barres laminées, étirées et recuites;

2° Sur barres brutes de coulée.

I. — SUR BARRES LAMINÉES, ÉTIRÉES ET RECUITES

COMPOSITION			PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES					
Cu	Mn	Zn	R	E	A 0/0	Σ	CHOC	DURETÉ
57,5	2,60	39,7	35,3	14,2	42,5	73,1	14	57
57,4	3,04	39,5	37,2	14,5	39	51,9	14	57
54,6	4,38	39,6	48,1	16,7	30,5	36,8	13	64
54,8	6,00	40,0	49,2	18,8	29	34,4	12	64
54,3	5,59	39,5	47,4	17,3	31	35,5	8	72
52,3	6,98	39,9	49,1	20,7	17	19,2	6	76
50,8	9,15	39,6	54,3	19,3	21	21,9	3	83
50,2	9,59	39,8	55,1	21,7	20	18,5	3	96

II. — SUR BARRES BRUTES DE COULÉE

(Ici le manganèse a été substitué au zinc)

COMPOSITION			PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES				
Cu	Mn	Zn par différence	R	E	A 0/0	CHOC	DURETÉ
			1er type				
60	0	40	31,9	8,1	47	12	50
60,1	0,3	39,6	34,4	8,9	48	13	54
59,4	0,8	39,8	34,9	8,9	49	13	54
59,7	1,9	38,4	35,5	9,8	49	12	56
60,3	3,0	36,7	34,2	11,8	45	11	57
60,8	4,7	35,5	38,6	13,5	37	8	64
59,6	6,2	34,3	35,5	13,1	18	7	83
			2e type				
70,4	0	29,6	13,7	5,7	50	11	32
70,6	0,4	30,0	20,3	4,7	57	11	32,8
70,3	0,9	29,0	19,7	6,5	45	11	36,5
69,7	2,1	28,2	20,6	5,5	47	11	38
70,8	2,9	26,3	20,3	7,4	34	11	38
70,5	4,2	25,3	23,7	12,9	44	9	43
68,9	6,1	25,0	19,6	10,1	17	10	50
70,2	9,2	20,5	30,5	12,9	32	9	54

De ces nombreux essais portant sur des types très différents on doit conclure que l'effet du manganèse est (*fig.* 173 à 175) :

1° D'élever la charge de rupture d'une façon très sensible;

2° D'élever également la limite élastique;

3° D'augmenter d'abord, puis d'abaisser nettement les allongements et les strictions[1];

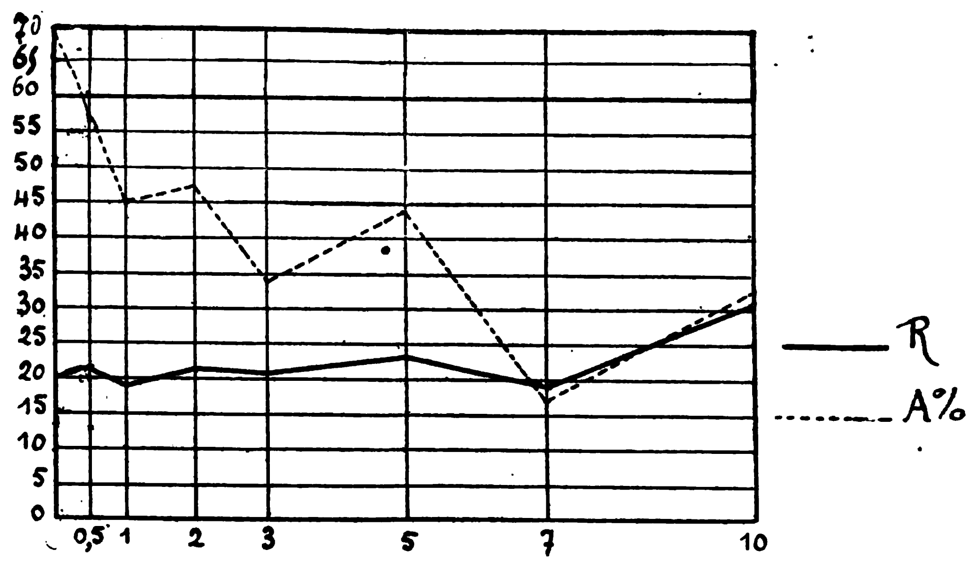


Fig. 175. — Laitons au manganèse, 2e type. Barres brutes de coulée.

4° D'augmenter la fragilité seulement à partir de 4 0/0;

5° D'augmenter la dureté très lentement.

Voici, d'autre part, les résultats donnés par M. Guillemin :

1° Bronze manganèse tendre fondu au réverbère et coulé en sable à basse température (1.200°) :

R	36
E	14
A 0/0	30

1. L'augmentation des allongements ne se fait sentir que pour une quantité faible de manganèse ; c'est pourquoi on ne le note pas sur les barres recuites.

Bronze manganèse tendre, fondu au réverbère et coulé en sable plus chaud (1.250°) :

R	34
E	13
A 0/0	35

Bronze manganèse tendre fondu au réverbère et coulé en sable très chaud (1.300°) :

R	31
E	12
A 0/0	45

Bronze manganèse tendre fondu au réverbère et coulé en sable beaucoup trop chaud (1.400°) :

R	24
E	9
A 0/0	13

Bronze manganèse mi-dur (bronze Roma) [1], fondu au creuset et coulé en sable à une température modérée (1.250°) :

R	37
E	17
A 0/0	25

Bronze manganèse dur (bronze Roma), fondu au réverbère et coulé en sable à une température modérée :

R	40
E	20
A 0/0	18

Bronze manganèse très dur (bronze Roma), fondu au réver-

1. Cette désignation est prise dans la note de M. Guillemin ; il faut bien noter cependant que des analyses récentes de certaines marques de bronze Roma indiquent qu'il n'y a pas de manganèse.

bère et coulé en sable à une température modérée (1.250°) (hélices du *Jauréguiberry*) :

R	45
E	24
A 0/0	15

Bronze manganèse mi-dur, laminé à chaud et recuit :

R	45
E	18
A 0/0	30

Bronze manganèse mi-dur (bronze Roma), laminé à chaud, estampé et recuit :

R	56
E	30
A 0/0	25

Bronze manganèse ferreux dur, de provenance anglaise fondu au creuset, et coulé en sable à une température modérée :

R	36
E	17
A 0/0	10

(Dans les essais de M. Guillemin, les températures ont été mesurées avec la lunette pyrométrique Ducretet.)

Enfin, il est nécessaire de parler des propriétés des barres laminées, forgées, etc..., car c'est dans un certain état d'écrouissage que l'industrie consomme une grande partie de ces métaux.

Voici ce que les fabricants peuvent couramment garantir :

	R	E	A 0/0
Pièces moulées	35 à 40 kilos	15 à 20 kilos	15 à 25 0/0
Barres étirées	40 à 50 —	20 à 30 —	15 à 25 0/0
Pièces forgées	40 à 45 —	20 à 25 —	20 à 30 0/0
Tôles laminées	38 à 45 —	15 à 20 —	18 à 25 0/0
Fils finis	Jusqu'à 105	85	»

Les propriétés des barres étirées et des pièces forgées dépendent essentiellement de l'écrouissage qu'elles ont subi.

Il en est *a fortiori* de même pour les fils.

On fait même en ces alliages des tubes sans soudures, ils ont les propriétés suivantes :

R............	45 à 60 kilogrammes
E............	20 à 40 —
A 0/0........	15 à 25 —

Enfin, voici les résultats obtenus par la maison Garnier et Coutaud sur les hélices faites avec le bronze Roma de M. Guillemin.

RÉSULTATS DES ESSAIS DE RECETTE

Effectués sur les hélices en bronze Roma (de torpilleurs) d'un poids inférieur à 400 kilogrammes coulées à la fonderie de Lille du 1er janvier au 5 septembre 1902.

DATES	DÉSIGNATION DES HÉLICES	RÉSISTANCE	ALLONGEMENT 0/	R + A
Janvier 6	Ailes d'hélices orientables.....	44k45	26,35	70,76
— 15	1re Hélice « Cyclone »........	46.72	26,20	72,92
— 15	Ailes d'hélices orientables.....	45.95	29 »	74,95
— 28	2e Hélice « Cyclone ».........	44.47	21,66	66,13
Février 25	Ailes d'hélices orientables.....	49.95	19,50	69,45
Avril 3	Ailes d'hélices torpilleurs 200.	49.50	27,50	77 »
Mai 30	Hélices « Kabyle »..........	46.96	30,83	77,19
Juin 10	Hélices Torpilleur 144........	46.08	28,66	74,74
Juillet 19	Hélices « Agile ».............	51.02	26 »	77,02
Août 12	1re Hélice « Takou »..........	46.73	30,87	79,60
Sept. 5	2e —	49.50	29 »	78,50
	MOYENNE GÉNÉRALE......	47,57	26,86	74,43

La circulaire ministérielle du 18 août 1897 impose, pour les pièces ci-dessus, les caractéristiques suivantes :

R........	35 kilogr.	R + A..... 53.
E........	16 —	
A........	18 0/0	

Les types de laitons au manganèse les plus employés dans l'industrie sont au nombre de deux :

Premier type :

Cu	59 à 60
Mn	traces
Zn	41 à 40

Deuxième type :

Cu	58 à 59
Mn	1,8 à 2,2
Zn	40 à 39

Empressons-nous d'ajouter d'ailleurs que les laitons au manganèse *seul* ne sont pas les plus usités.

Nous parlerons dans un paragraphe spécial à la fin de ce chapitre des propriétés à chaud de ces produits métallurgiques.

La *Manganese-Bronze and Brass Company* a donné les résultats obtenus en comparant la dureté de certains métaux à celles du bronze manganésé ordinaire et du bronze manganésé coulé sous pression. Voici les résultats de ces essais faits au moyen d'un couteau à bord tranchant qui faisait dans chaque métal une même entaille. Les pressions nécessaires pour obtenir cette entaille variaient avec chaque métal. Elles ont été les suivantes :

Métal à canons	12
Fer forgé	15
Acier doux	20
Acier doux trempé dans l'huile	25
Bronze manganésé	20
Bronze manganésé durci par pression	22 à 23

Nous ferons remarquer que la composition des alliages n'est toujours pas donnée.

La *Manganese-Bronze and Brass Company* en déduit l'emploi de ce métal pour la construction des pièces devant résis-

ter à de fortes pressions intérieures, telles que cylindres hydrauliques et autres.

Utilisations. — Les laitons au manganèse sont utilisés :

1° En *pièces moulées*, pour la fabrication des hélices, des tubes lance-torpilles, des gouvernails, des étambots, des pièces d'affût, des cylindres hydrauliques, de pièces devant supporter intérieurement de fortes pressions, de soupapes, etc. ;

2° En *pièces forgées*, des arbres d'hélice, des tiges de piston et tiroir, des frettes, etc., des boulons, etc. ;

3° En *barres étirées*, pour de nombreuses pièces de décolletage demandant une forte résistance, notamment des boulons, des rivets, etc. ;

4° En *tôles*, *profilés*, etc., pour les constructions maritimes, notamment pour des plaques soumises à des températures un peu élevées.

En effet il faut se rappeler que ces métaux se travaillent fort bien à chaud, ils présentent même de grandes facilités de forgeage, d'emboutissage à chaud, de cintrage, etc. De plus, ils résistent assez bien à l'eau de mer et n'ont aucune action sur la boussole.

De toutes ces applications la plus importante est assurément l'emploi pour la construction des hélices.

A ce sujet Hiorns cite, dans son livre sur *les Alliages métalliques*, une série d'expériences et de conclusions des plus intéressantes.

A cause de la grande résistance et de l'inaltérabilité de ce métal, les ailettes d'une hélice peuvent être faites moins épaisses que si l'on employait l'acier. Leurs surfaces sont très unies et, après être coulées, elles conserveront théoriquement leur forme; avec l'acier, il faut tenir compte de la corrosion possible ; de plus, la forme des ailettes est modifiée pendant l'opération du recuit qu'elles doivent subir après la coulée. Il a été prouvé, par les journaux de quelques bateaux à vapeur qui avaient eu leurs hélices d'acier remplacées par des hélices de bronze manganésé, que leur vitesse avait été aug-

mentée et la consommation de charbon diminuée, pendant que le poids, les vibrations et les efforts sur le navire et sur la machinerie avaient été considérablement réduits. Bien plus, en même temps que ces avantages, il y a une grande diminution de prix si l'on considère la durée moyenne d'un vaisseau; car, quoique le prix d'installation d'une hélice en bronze manganésé soit le double de celui d'une hélice en acier, pratiquement elle est indestructible; l'hélice en acier doit être renouvelée à la fin de la troisième année de service, ce qui en porte le prix moyen à deux ou trois fois celui de l'hélice en bronze manganésé.

Ces qualités remarquables du bronze manganésé n° 3 sont démontrées par un accident survenu à l'hélice du *Garth Castle*, lancé par MM. John Elder et Cie, en 1880. Au moment du lancement, une ailette vint en contact avec la jetée et fut courbée presque à angle droit, sans craquement; elle put être ramenée par martelage à froid à la forme primitive.

Un autre exemple est donné par l'hélice du *Mosel* de la North Company Lloyd, qui fit naufrage; on retrouva l'une des ailettes de l'hélice complètement doublée sur elle-même, ce qui donne une idée de la ténacité du métal.

Voici les résultats donnés par Hiorns sur divers bronzes :

Les numéros 4 et 5 n'ont aucune propriété particulière, quant à la résistance ; mais ils sont recherchés pour les coussinets, les tiroirs, les glissières, les segments de piston, etc.

ESSAI DE BRONZE MANGANÉSÉ AU POINT DE VUE « TENSION »

NUMÉROS	DESCRIPTION	E	R	A 0/0	REMARQUES
1	N° 1, tubes laminés à chaud	17,3	45,7	44,6	Doux, recuit pour river à froid.
2		20,7	46,2	33,4	Recuit.
3		37,1	49,8	26,5	A la sortie du laminoir.
4		38,3	49,5	23,3	
5		54,2	62,5	11,6	A la sortie du laminoir et fini à froid.
1	N° 2, lames laminées à chaud	22,1	44,9	23,2	A travers la fibre. Recuit.
2		22,1	47,5	47,8	Suivant — —
3		23,3	48,5	34,1	A travers — —
4		26,3	47,5	28,8	Suivant — —
1	N° 2, coulé sous pression	28,4	55,2	22,0	Coulé dans un cylindre de fer et pressé à l'état liquide, le numéro 1 vient des parois du lingot, le numéro 2 du centre.
2		25,6	50,3	11,4	

ESSAI DE BRONZE MANGANÉSÉ, AU POINT DE VUE « TORSION »

NUMÉROS	DESCRIPTION	DIAMÈTRE EN MILLIMÈTRES	MOMENTS DE TORSION EN KILOGRAMMÈTRES — Limite élastique	MOMENTS DE TORSION EN KILOGRAMMÈTRES — Limite de rupture	ACCROISSEMENT DE LA TORSION en fonction du diamètre Nombre de tours	REMARQUES
1	N° 2, coulé sous pression....	15,80	13,5	38,6	0,183	Torsion uniforme.
2		15,85	13,8	38,8	0,166	—
3	N° 1, laminé..	15,77	12,8	38,1	0,175	Recuit.
4	Tube.........	15,77	22,8	37,3	0,165	Laminé à chaud et essayé à la sortie des laminoirs.

Le numéro 3 a été retiré non brisé de la machine. Le numéro 4 était rompu, montrant une surface nette.

ESSAI D'UNE BARRE DE BRONZE MANGANÉSÉ N° 3 AU POINT DE VUE DE L'EFFORT TRANSVERSAL

(1 carré de 25 millimètres, coulé dans le sable, placé sur des supports distants de 0^m,305 ; une pression constante est exercée sur le milieu de la barre.)

EFFORT EN KILOGRAMMES	ÉCART PAR EFFORT de haut en bas Millimètres	ÉCART PERMANENT PAR EFFORT de bas en haut Millimètres	EFFORT EN KILOGRAMMES	ÉCART PAR EFFORT de haut en bas Millimètres	ÉCART PERMANENT PAR EFFORT de bas en haut Millimètres
273	0,64	»	849	5,3	3,0
341	0,76	»	956	11,2	8,6
409	1,00	»	1.092	21,8	18,5
478	1,15	»	1.229	41,1	36,6
546	1,52	0,13	1.263	50,0	»
580	1,65	0,25	1.297	Supporte l'effort sans rupture, et se courbe à angle droit.	

EXPÉRIENCES SUR L'EFFORT TRANSVERSAL ET LA TÉNACITÉ DE BARRES DE BRONZE MANGANÉSÉ COMPARATIVEMENT AU FER FORGÉ ET AU MÉTAL A CANONS, PAR APPLICATION D'UN POIDS SUR LE MILIEU DE LA BARRE SOUTENUE A CHACUNE DE SES EXTRÉMITÉS.

(Poids du mouton, 22^{kg},7 ; hauteur de chute, 1^m,524 ; distance entre les supports, 0^m,305 ; dimensions de la barre : carré de 25 millimètres sur 0^m,356 de longueur.)

NOMBRE DE COUPS	FER FORGÉ		MÉTAL A CANONS						BRONZE MANGANÉSÉ			
	LAMINÉ		COULÉ DANS LE SABLE						N° 3 COULÉ DANS LE SABLE		N° 1 FORGÉ	
	N° 1	N° 2	N° 1	N° 2	N° 3	N° 4	N° 5	N° 6	N° 3	N° 4	N° 5	N° 6
	millim.	millim.	millim.	millim.	millim.	millim.	millim.	millim.	millim.	millim.	millim.	millim.
1	14,5	14,7	20,8	21,8	22,9	18,3	18,5	11,7	16,8	15,2	15,0	15,2
2	27,9	29,2	38,1	40,1	41,4	33,5	36,1	brisé	30,5	29,2	26,9	27,4
3	41,1	43,4	43,2	56,4	59,7	48,8	38,6	»	43,2	40,6	36,6	38,1
4	54,1	56,6	brisé	brisé	72,6	49,3	brisé	»	56,6	52,6	45,7	48,0
5	67,3	70,4	»	»	brisé	brisé	»	»	67,8	64,0	53,8	57,4
6	81,0	85,6	»	»	»	»	»	»	79,0	75,4	62,2	67,3
7	95,8	101,3	»	»	»	»	»	»	90,9	86,1	75,4	75,9
8	111,5	117,6	»	»	»	»	»	»	102,1	102,6	77,5	85,9
9	non brisé	»	»	»	»	»	»	»	non brisé	à moitié brisé	84,6	non brisé
10	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	non brisé	»
11	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
12	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
13	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»

LAITONS A L'ALUMINIUM

Etude théorique (Album, Pl. LXI et LXII, Phot. 241 à 248). — Le rôle général de l'aluminium en métallurgie est celui de désoxydant.

C'est aussi l'un de ceux qu'il joue dans la fabrication des laitons.

Bien qu'il n'ait pas encore été fait d'étude très complète sur les laitons à l'aluminium, on sait depuis plusieurs années que l'addition d'une proportion de 2 à 3 0/0 d'aluminium à un laiton du type Cu = 70, Zn = 30, fournit un produit qui a à peu près la structure des laitons forgeables et qui s'en rapproche également au point de vue de la résistance (Charpy, *Recherches sur les alliages de cuivre et de zinc*).

Nous avons entrepris des recherches complètes sur ces alliages tant au point de vue micrographique que mécanique.

L'étude que nous avons faite a porté sur deux types de laitons :

Premier type :

Cu....................	70
Zn....................	30

Deuxième type :

Cu....................	60
Zn....................	40

Nous avons ajouté à chacun d'eux des quantités d'aluminium allant de 1 à 10 0/0 et le substituant toujours au zinc, l'aluminium étant ajouté sous forme de métal, la plus grande partie dans le creuset placé au four, le reste au moment même de la coulée, le creuset retiré du four.

Voici tout d'abord les phénomènes que nous avons notés. Des traces d'aluminium (0,5 à 1 0/0) donnent au laiton à 60 0/0 cuivre, 40 0/0 Zn, une coloration or très belle.

Cette coloration se maintient jusqu'aux environs de 5 0/0. Là l'alliage devient légèrement rose. Il acquiert une superbe

coloration rose à 7 0/0; il est alors dichroïque; vu sous une certaine incidence, il est blanc argent.

A 10 0/0, l'alliage devient d'un blanc argent.

Jusqu'à 4 0/0, il se travaille très bien à chaud.

Au-delà de 4 0/0, il devient très difficile à travailler: le laminage peut encore se faire à chaud; mais le métal se brise à l'étirage.

A partir de 6 0/0 d'aluminium, on ne peut plus laminer.

La micrographie de ces alliages est très intéressante.

Si l'on ajoute 0,5 0/0 d'aluminium à l'alliage renfermant 60 0/0 de cuivre et 40 0/0 de zinc, on ne trouve aucune transformation dans la microstructure.

Dès 1 0/0 les cristaux de ZnCu sont beaucoup plus détachés. A 2 0/0, on ne trouve plus du tout les cristaux caractéristiques des laitons forgeables, mais bien seulement des polyèdres comme dans les laitons renfermant moins de 55 0/0 de cuivre.

A 5 0/0, on trouve des polyèdres et dans ceux-ci des petits cristaux analogues à ceux rencontrés par M. Charpy; dans les laitons renfermant environ 50 0/0 de cuivre et 7 0/0 d'aluminium, on trouve toujours des polyèdres; mais ils sont entourés de plages noires.

L'alliage à 10 0/0 est tellement fragile qu'il ne nous a pas été possible de le polir.

Les laitons à l'aluminium renfermant 70 0/0 de cuivre ne sont pas moins intéressants à étudier.

Quand l'aluminium ne dépasse pas 2 0/0, on trouve à ces laitons la microstructure ordinaire. Mais, dès que l'aluminium dépasse 2 0/0, on voit apparaître le constituant β.

A 6 0/0 d'aluminium, on ne trouve plus que des polyèdres.

A 10 0/0, on voit se développer dans ces polyèdres de très nombreux petits cristaux.

En résumé, les laitons à l'aluminium ont même microstructure que s'ils renfermaient plus de zinc.

Leur coloration, d'une part, leur travail au laminoir et au banc à étirer conduisent aux mêmes conclusions.

A 2 0/0 d'aluminium, le laiton renfermant 60 0/0 de cuivre possède même structure que s'il contenait seulement 55 0/0 de cuivre. Le métal ayant pour composition :

Cu	60
Al	2
Zn	38

possède même structure que l'alliage

Cu	55
Zn	45

On voit que 2 0/0 d'aluminium ont joué le même rôle que 7 0/0 de zinc. Donc l'addition de 1 0/0 d'aluminium équivaut à peu près à 3,5 0/0 de zinc.

De même, l'alliage

Cu	70
Al	2
Zn	28

possède même structure que l'alliage

Cu	65
Zn	35

On voit que là encore 1 0/0 d'aluminium a joué le rôle de 3,5 0/0 de zinc :

Enfin l'alliage

Cu	70
Al	6
Zn	24

possède la même structure que l'alliage

Cu	55
Zn	45

6 0/0 d'aluminium ont donc joué le même rôle que (45 — 24) 21 0/0 de zinc.

Et l'on retrouve toujours la même conclusion :

A savoir que 1 0/0 d'aluminium joue le même rôle que 3,5 de zinc.

Nous verrons tout à l'heure qu'il en est de même au point de vue des propriétés mécaniques.

Étude industrielle. — Fabrication. — Le laiton à l'aluminium s'obtient ordinairement par fusion directe du cuivre, du zinc et de l'aluminium. Ce dernier métal étant fort difficile à allier, par suite de sa faible densité, il faut mélanger la masse fondue avec grands soins. De plus, on réserve généralement quelque quantité d'aluminium pour l'ajouter à la fin au moment même de la coulée, ce produit devant toujours jouer le rôle d'épurateur.

On emploie souvent, au lieu d'aluminium pur, un alliage cuivre-aluminium obtenu dans une opération préalable.

Enfin, comme dans toutes ces fabrications, on utilise souvent des déchets de planches, de tubes, etc..., pourvu que ceux-ci ne contiennent pas d'impuretés.

Les laitons à l'aluminium se ramènent à trois types principaux :

Cu............	68 à 70
Zn............	31 à 27
Al............	1 à 3
Cu............	64 à 66
Zn............	33 à 30
Al............	1 à 4
Cu............	58 à 61
Zn............	40,5 à 37,5
Al............	0,3 à 1,5

Au premier type, il faut rattacher le laiton de Froges;

d'après certaines analyses le bronze Roma se rattache au second[1].

Enfin, la marine consomme du laiton du second type, notamment pour la construction des torpilles.

Propriétés. — Les laitons d'aluminium ont des grains extrêmement serrés. Ils possèdent une résistance bien supérieure à celle des laitons ordinaires.

C'est ainsi que les alliages du premier type peuvent donner de 25 à 45 kilogrammes de charge de rupture par millimètre carré; que les alliages du deuxième type donnent jusqu'à 50 kilogrammes de résistance.

Voici les résultats des essais qui ont été faits sur l'ordre du Ministère de la Marine des États-Unis.

On y a comparé du bronze d'aluminium, du bronze à canons et du laiton d'aluminium.

1. Dans sa récente étude sur l'influence des basses températures sur les alliages, M. Hadfield, le savant président de l'Iron and Steel Institute donne, comme analyse du métal Delta,

Zn	44,06
Cu	55,01
Al	0,47

Nous donnons plus loin d'autres analyses d'alliages vendus sous le même nom.

ESSAIS DE BRONZE ET DE LAITON D'ALUMINIUM (MINISTÈRE DE LA MARINE DES ÉTATS-UNIS)

MARQUES ou NUMÉROS	COMPOSITION APPROCHÉE Cu	Al	Si	Zn	Sn	LONGUEUR ENTRE LES SUPPORTS (en millimètres)	DIAMÈTRE (en millimètres)	SECTION (en millimètres carrés)	RÉSISTANCE A LA TENSION (kilogrammes par millimètre carré)	LIMITE D'ÉLASTICITÉ (kilogrammes par millimètre carré)	ALLONGEMENT 0/0 sur 380 millimètres	RÉDUCTION de la section 0/0	DIAMÈTRE APRÈS RUPTURE en millimètres	
BRONZE OU LAITON D'ALUMINIUM 1 C	91,5	7,75	0,75	»	»	381	47,6	1.780	95,7	28,4	23,20	30,7	39,6	COULAGE en sable vert
7 C	88,66	10,0	1,33	»	»	id.	47,6	1.780	104,0	42,5	3,80	7,8	45,7	
9 C	91,5	7,75	0,75	»	»	id.	47,6	1.780	106,5	37,8	13,00	21,62	42,2	
10 C	90,0	9,0	1,0	»	»	id.	47,6	1.780	114,7	52,0	2,40	5,78	46,2	
11 C	63,0	3,5	0,33	33,3	»	id.	47,6	1.780	129,5	94,5 à 115	2,33	9,88	45,2	
11 D	63,0	3,33	0,33	33,3	»	id.	48,25	1.829	111,0	86,7	0,40	4,33	47,2	
13 C	92,0	7,5	0,5	»	»	id.	47,6	1.780	93,2	30,0	15,1	23,59	41,7	
9 D	91,5	7,75	0,75	»	»	id.	48,25	1.829	83,5	30,0	6,2	15,50	44,4	COULAGE en sable sec
10 D	90,0	9	1,0	»	»	id.	48,0	1.810	110,1	52,0	1,33	3,30	47,2	
13 D	92,0	7,5	0,5	»	»	id.	49,0	1.886	73,5	26,8	7,80	19,19	43,9	
1	88,0	»	»	2,0	10,0	id.	47,6	1.780	28,4	15,8	2,50	4,70	46,5	COULAGE en coquilles
2	88,0	»	»	2,0	10,0	id.	47,6	1.780	38,8	17,3	8,20	6,80	46,0	
3	88,0	»	»	2,0	10,0	id.	47,6	1.780	35,5	17,3	5,80	10,89	45,0	
4	88,0	»	»	2,0	10,0	id.	47,75	1.791	36,3	20,5	4,00	10,36	45,2	
5	88,0	»	»	2,0	10,0	id.	47,75	1.791	32,4	20,5	2,33	6,30	46,2	
6	88,0	»	»	2,0	10,0	id.	47,75	1.791	27,4	20,5	3,70	7,30	46,0	

ESSAIS DE DURETÉ DE GRANDES BARRES (bronze et laiton d'aluminium)

MARQUES	DURETÉ dans l'extrémité	DURETÉ du corps
1 C	9,39	13,85
7 C	14,12	14,26
9 C	11,18	13,59
11 C	14,69	10,60
10 D	17,08	60,07

DURETÉ DU BRONZE DES ATELIERS DE LA MARINE

MARQUES	DURETÉ dans l'extrémité	DURETÉ du corps
N° 1	3,33	3,33
N° 2	3,67	6,56

Le bronze des ateliers de la Marine était fourni par le Gouvernement et coulé avec soin dans les ateliers de New-York, sous la surveillance d'un officier.

William H. Harris.
Maître Mécanicien
U. S. N.

On notera les quantités importantes de silicium contenues dans les alliages renfermant de l'aluminium. Le silicium a dû être apporté par l'aluminium impur.

Nous donnons les résultats des alliages que nous avons obtenus dans les essais que nous avons effectués :

1° Sur barres brutes de coulée;

2° Sur barres laminées, étirées et recuites sur des laitons du type 60-40.

1° EXPÉRIENCES SUR BARRES BRUTES DE COULÉE

COMPOSITION			PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES				
Cu	Zn par différence	Al	R	E	A 0/0	CHOC	DURETÉ
Premier type							
60,0	40,0	0	31,9	8,1	47	12	50
59,6	40,1	0,3	32,3	9,9	51,5	19	51
59,9	40,3	0,8	30,9	9,5	45	14	52
59,6	38,5	2,9	46,0	11,8	14	9	101
60,4	35,9	4,7	44,1	17,8	2	5	148
Deuxième type							
70	29,6	0	13,7	5,7	50	11	32
69	29,9	0,4	20,3	4,7	59	13	33,8
70	28,8	0,9	22,7	6,6	67	13	33,8
70,5	26,4	3,1	33,9	13,5	50	7	65
70,1	24,7	5,2	50,8	7,4	11	5	107

Tant qu'au laiton renfermant environ

Cu	70
Zn	20
Al	10

il présente une dureté telle qu'il a été impossible de le travailler.

2° EXPÉRIENCES SUR BARRES LAMINÉES, ÉTIRÉES ET RECUITES

COMPOSITION			PROPRIETÉS MÉCANIQUES					
Cu	Zn	Al	R	E	A 0/0	Σ	CHOC	DURETÉ
61,4	38,4	0,7	35,2	10,1	45	57,7	17	52
60,3	38,2	1,1	38,1	11,3	36	43,2	16	59
61,0	37,7	1,4	36,7	12,3	43,5	53,6	16	65
59,9	37,9	2,0	39,1	18,1	17	19,6	9	123
59,8	37,2	2,7	44,5	17,7	16	12,6	7	123
60,0	36,4	3,9	48,1	18,3	13	13,9	5	148

Ces essais, qui se rapportent à des alliages du type

Cu	60
Zn	40

dans lequel l'aluminium remplace le zinc, prouvent que (*fig.* 176 à 178) :

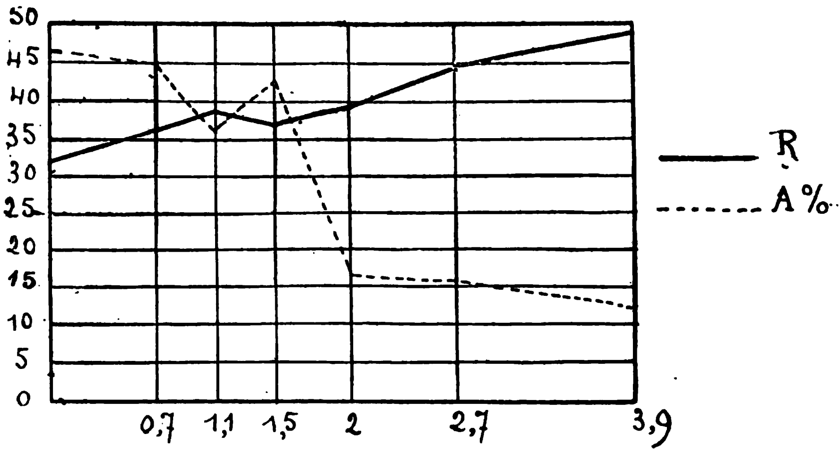


Fig. 176. — Laitons à l'aluminium. — Barres laminées.

1° L'aluminium augmente la charge de rupture et la limite élastique ;

2° Il commence par augmenter, puis diminue un peu les allongements ;

3° Il augmente très nettement la résistance lorsqu'il est en petites quantités;

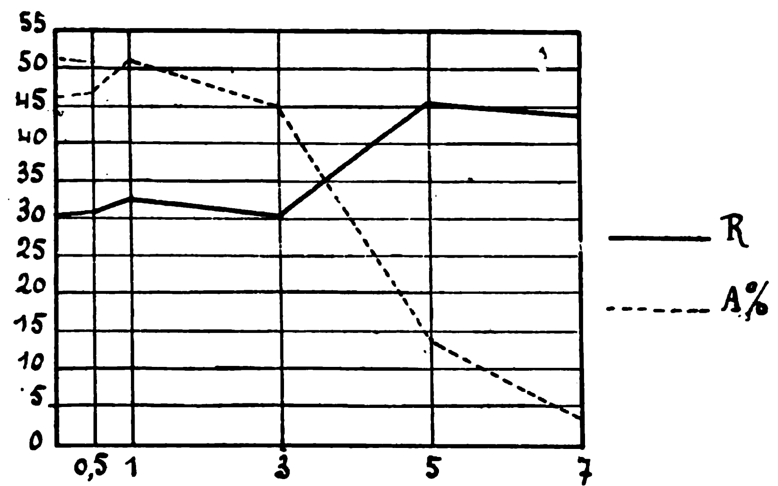


Fig. 177. — Laitons à l'aluminium, 1er type. — Barres brutes de coulée.

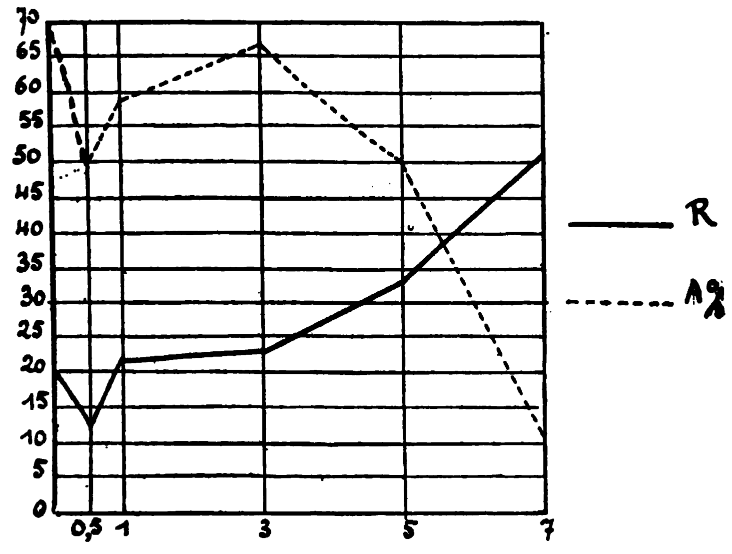


Fig. 178. — Laitons à l'aluminium, 2e type. — Barres brutes de coulée.

4° Il n'augmente la dureté qu'à partir d'un pourcentage assez élevé; mais on a alors des laitons très durs.

Utilisations. — Les emplois des laitons à l'aluminium sont les mêmes que ceux des laitons au manganèse.

Il faut cependant ajouter que les laitons à l'aluminium ont été employés en France pour la construction des sous-marins. Ils n'ont pas donné à ce point de vue toute satisfaction.

Nous avons aussi signalé l'emploi qu'en fait l'Administration de la Marine française.

LAITONS AU FER

Etude théorique. — L'introduction du fer dans les laitons et les bronzes n'est point nouvelle ; on trouve, en effet, des quantités importantes de fer — qui ne sauraient être regardées comme impuretés — dans des alliages très anciens.

On n'a encore aucun travail théorique indiquant l'état sous lequel le fer se trouve dans les laitons.

Étude industrielle. — Fabrication. — Le procédé le plus employé autrefois pour la préparation de ces alliages utilisait comme matière première des alliages cuivre-fer. C'est ainsi que l'on opérait pour préparer le sterro-métal et le métal d'Aich, que nous définissons plus loin.

Mais les résultats obtenus n'étaient pas constants. Cela provenait de ce que la matière première n'était pas homogène.

La méthode moderne de préparation de ces alliages est due à M. Alexandre Dick, qui créa des alliages très utilisés dans l'industrie sous le nom de métal Delta (première lettre grecque du nom de Dick).

Cette méthode consiste essentiellement dans l'emploi d'un alliage fer-zinc comme matière première.

Nous avons déjà examiné ce qu'étaient ces alliages (chap. vi).

On introduit cet alliage dans le cuivre fondu en quantité convenable pour la dose de fer que l'on veut obtenir.

Actuellement, cependant, l'industrie commence à livrer des alliages cuivre-fer homogènes renfermant 8 à 10 0/0 de fer et même plus.

Pour éviter toute oxydation, il faut ajouter un réducteur quelconque, phosphore ou manganèse.

PROPRIÉTÉS. — Les propriétés caractéristiques des laitons au fer sont : une résistance élevée à la rupture, une grande malléabilité à chaud, une certaine résistance aux agents chimiques.

Dans le rapport qu'il a présenté à *The Balloon Society*, le 15 octobre 1889, M. Mac Intyre fait ressortir les avantages du métal Delta pour les constructions en général et plus spécialement pour les constructions maritimes et les constructions sanitaires.

Les principaux types de laitons au fer ont été ou sont :

Le *sterro-métal* dont on connaît deux compositions :

1°	Cu	60
	Zn	38 à 38,5
	Fe	2 à 1,5
2°	Cu	55
	Zn	42,36
	Fe	1,77
	Sn	0,83

Ce dernier a donné les résultats suivants comme charge de rupture (essais du baron Bosthorn) :

Coulé	42,5 kilos de charge de rupture par millim. carré	
Forgé	53,5	—
Étiré à froid	59,9	—

D'ailleurs le sterro-métal obtenu par la méthode que nous avons indiquée donnait des résultats très différents suivant les coulées. Nous en avons exposé la raison.

Le métal d'Aich, préparé par la même méthode que le sterro-métal, se rapproche beaucoup de ce dernier alliage et est aussi hétérogène que lui.

Voici les analyses qu'en donne Hiorns :

1°	Cu	60,66
	Zn	36,58
	Sn	1,02
	Fe	1,74

2° Cu 60,0
Zn 38,2
Fe 1,8

3° Cu 60,2
Zn 38,2
Fe 1,6

4° Cu 58,26
Zn 41,0
Fe 0,74

Le métal Delta a pour composition ordinaire[1] :

Cu 55
Zn 41
Fe 3
Mn et autres 1

Le métal Delta, préparé suivant la méthode de M. Dick, a donné au Bureau d'Essais du Lloyd les résultats suivants :

MARQUES	DESCRIPTION	DIMENSION ET ÉTAT DE l'échantillon (millimètres)	SECTION PRIMITIVE (millimètres carrés)	SECTION DE LA CASSURE (millimètres carrés)	EFFORT PERMANENT en kil. par millim. car.	EFFORT MAXIMUM en kil. par millim. car.	ALLONGEMENT 0/0 sur 203 millimètres	APPARENCE DE LA CASSURE	REMARQUES
N° 1	Barre carrée (recuite)	12,7 diam. — tourné.	126,63	81,80	»	43,8	39	Soyeuse et lég[t] laminée	»
N° 2	Barre plate (recuite)	36,6×3,25	118,89	71,09	19,0	47,2	36	Granulée et soyeuse	»
N° 3	Barre ronde	12,6 diam. — tourné.	124,12	87,22	36,8	50,5	23	id.	»
N° 4	Barre hexagonale	12,4 diam. — tourné.	121,60	81,03	39,4	49,3	11	id.	Rompue pendant l'extens.
N° 5	Barre plate	36,6×3,25	118,89	104,51	21,6	55,7	14	Soyeuse	»

1. Il faut noter, comme nous l'avons déjà dit, que le savant métallurgiste Hadfield dans sa communication au Congrès de Liège (*Influence des basses températures sur les alliages*) a donné comme composition du métal Delta : Cu = 55,01 ; Zn = 44,06 ; Al = 0,47 ; le reste doit être du fer.

D'autre part, des essais des plus intéressants ont été faits par M. Tetmajer sur l'emploi du métal Delta pour la confection des engrenages. Le *Schweizerisches Gewerbeblatt* en rendit compte dans le numéro du 8 janvier 1889.

« Dans les premières locomotives du chemin de fer du mont Pilate, on demandait une matière pouvant être coulée et ayant une grande résistance à la tension et une grande élasticité. Le métal Delta répondait à ces exigences : les roues du système de freins à engrenage étaient faites avec ce métal, et elles furent d'un très bon usage. Les essais furent faits par le professeur Tetmajer, de Zurich ; on trouva une résistance à la tension de 35 à 37 kilogrammes par millimètre carré, avec un allongement de 30 à 40 0/0 sur une longueur de 200 millimètres. » Le capitaine Locher a aussi fait des essais. Un des pignons en métal Delta ayant été en service pendant longtemps les dents étaient usées de 0,8 millimètre environ ; leur épaisseur à la base était de 16 millimètres, et à la tête de 11 millimètres ; la largeur était de 125 millimètres.

On essaya quelle devait être la puissance nécessaire à la rupture d'une telle dent. L'essai fait par M. le professeur Tetmajer a donné les résultats suivants :

P......	5	9	10	12	14	15	
ΔL.....	0	0,1	0,5	1,5	2,5	3,4	
P......	16	17	18	19	20	21	21,5
ΔL.....	4,3	5,3	6,2	7,5	9,0	12,0	rupture.

P indique la force en tonnes ; ΔL, le raccourcissement en millimètres de la longueur L, primitivement égale à 70 millimètres.

Les résultats sont tout à fait favorables.

Nous avons dit, d'autre part, que le métal Delta offrait une certaine résistance aux agents chimiques.

The Bonifacius Coal Mining Company of Westphalia a fait à ce sujet des essais concluants, en soumettant différents métaux à l'influence des liqueurs acides des mines. On a placé des barres de fer forgé, d'acier et de métal Delta dans l'eau venant d'une fosse, et l'on a vu que le métal Delta était, de beaucoup, le moins attaqué.

Sur des échantillons de métal Delta, nous avons obtenu les résultats suivants :

1° Type en barre moulée :

R	55 kilogrammes
E	16 —
A 0/0	20 —

1° Type en barre forgée :

R	62kg,3
E	18 ,2
A 0/0	23 ,0

2° Type en barre moulée :

R	39kg,0
E	13 ,2
A 0/0	20 ,0

2° Type en barre forgée :

R	53kg,2
E	19 ,1
A 0/0	32 ,0

Les planches en métal Delta donnent couramment les résultats suivants :

DÉSIGNATION	R	E	A 0/0
Planches laminées à chaud	45 à 60	20 à 40	30 à 15
— écrouies à froid	60 à 70	30 à 50	20 à 10
— recuites	40 à 50	10 à 20	45 à 30

Les laitons au fer ne se rouillent généralement pas, ils ne sont pas magnétiques.

En réalité, les laitons au fer actuellement utilisés renferment d'autres corps que du cuivre, du zinc et du fer, notamment de l'étain et du manganèse.

Utilisations. — Les emplois des laitons au fer sont à peu près les mêmes que ceux des laitons au manganèse et à l'aluminium. C'est surtout dans les constructions navales qu'ils trouvent leurs plus importants débouchés, pour les plaques de doublage, quilles, étambots, proues, hélices, ancres, tubes lance-torpilles, etc.

De plus, la facilité avec laquelle se travaillent ces alliages à chaud (vers 500 à 600°)[1] permet d'obtenir des corps de pompes, des soupapes, des robinets, etc., tiges de pompe, de piston, boulons, etc., qui offrent des qualités mécaniques très grandes après forgeage.

Les plaques de condenseur sont souvent faites en cet alliage.

Enfin, les constructions mécaniques l'utilisent pour des disques d'excentrique, des armatures de dynamo, des soupapes et des clapets.

LAITONS AU VANADIUM

Les premiers essais qui ont été faits sur les laitons au vanadium datent de 1896. Mais, d'après M. le capitaine Nicolardot[2], les résultats ne furent pas concluants, à cause d'accidents survenus, et ne fixèrent pas l'attention par suite de l'absence de toute analyse.

Le même auteur ajoute :

« Depuis, la métallurgie des laitons et tout particulièrement celle des bronzes au vanadium a rapidement progressé; un secret fort bien gardé entoure leur fabrication... Il semble qu'on s'arrête actuellement aux environs de 0,5 à 1 0/0 de

1. Au rouge cerise, ils sont extrêmement fragiles.
2 *Le Vanadium*. Collection Léauté.

vanadium ; mais là, plus encore qu'avec les aciers, les essais paraissent encourageants. A cause des nombreuses difficultés à vaincre, chaque industriel garde soigneusement le tour de main qu'il a su acquérir aux prix de pénibles et coûteuses recherches. »

Il semble bien, au contraire, résulter de l'enquête très approfondie que nous avons faite près des principaux fabricants d'alliages de cuivre français, allemands et anglais, que le secret de fabrication n'existe pas, pour la raison fort simple qu'aucun essai sérieux n'a été fait; et ceci parce que, jusqu'à ces derniers temps, les fabricants de cuprovanadium n'ont livré que des alliages hétérogènes, impossibles à utiliser.

Nous avons été ainsi conduits à entreprendre sur ces alliages des recherches qui ne sont pas encore terminées.

LAITONS COMPLEXES

Nous avons dit, au commencement de cette étude des laitons spéciaux, que les plus usités de ces alliages contenaient généralement plus de trois éléments. Il faut excepter toutefois les laitons au plomb employés en décolletage et les laitons à l'étain utilisés pour les constructions navales. Voici, d'ailleurs, quelques analyses connues de laitons spéciaux et leurs propriétés.

ALLIAGES DELTA (M. H. LE CHATELIER)

NUMÉROS	COMPOSITION						PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES SUR MÉTAL FORGÉ	
	Cu	Zn	Pb	Fe	Mn	Sn	R	A 0/0
I	55,2	41,4	0,64	1,19	1,12	0	47	37
IV	55,6	41,6	0,86	0,77	0,34	0,21	53 — 55	26 — 27
VIII	61,5	35,6	0,55	1,22	0,0	0	—	—

ALLIAGES DELTA (DEUTSCHE DELTA METAL GESELLSCHAFT)

	COMPOSITION						
	Cu	Zn	Pb	Fe	Mn	Pb	Ni
Métal fondu....	55,94	41,61	0,72	0,87	0,81	0,013	traces
— laminé...	55,82	41,41	0,76	0,86	1,38	traces	0,06
— forgé	55,80	40,07	1,82	1,28	0,96	0,011	traces
— embouti..	54,22	42,25	1,10	0,99	1,09	0,02	0,16

ANALYSES DU LABORATOIRE DE LA MARINE, 1896

	COMPOSITION								PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES		
	Cu	Zn	Fe	Mn	Al	Sn	Pb	Pertes	R	E	A 0/0
Roma ..	58,58	40,67	0,03	0	0,20	0	0,39	0,13	41	12	30
Delta...	57,43	38,90	0,69	2,06	—	—	0,71	0,21	33	13	13
Froges .	69,10	24,61	1,73	—	4,23	—	0,32	0,01	50	20	28
Stone ..	56,09	40,60	1,67	—	—	1,05	0,47	0,12	48	16	15
Bull....	57,23	40,22	0,30	—	0,15	1,49	0,34	0,29	34	16	6

On voit combien ces alliages sont de compositions variées et complexes. Quant à la différence trouvée dans les analyses des différentes marques, elle s'explique très aisément par les progrès qui ont été apportés durant ces dernières années dans ces fabrications et qui ont parfois changé entièrement les compositions et aussi par les variétés d'alliages connus sous le même nom.

Dans une étude que nous terminons actuellement et qui pourra faire partie, sans doute, de l'appendice de ce livre, nous chercherons à montrer la loi générale d'*équivalence* qui doit guider de la façon la plus sûre cette fabrication intéressante des laitons spéciaux.

Il faut noter, en terminant, la tendance de plus en plus accentuée d'ajouter à tous ces alliages une teneur d'étain de 1 0/0 donnant une beaucoup plus grande difficulté à l'attaque par l'eau de mer.

RÉSISTANCE DES MÉTAUX A L'EAU DE MER

Nous croyons devoir insister tout spécialement sur la propriété qu'offrent certains alliages de résister à l'eau de mer.

Nous reproduirons, tout d'abord, d'après la *Revue de Métallurgie* (mai 1904), le travail qu'ont présenté MM. Milton et Larke à l'*Institute of Civil Engineering* et la discussion qui a suivi cet exposé.

Indépendamment de la corrosion des métaux due à une oxydation complète donnant naissance à de la rouille ou à du vert-de-gris, certains métaux, le laiton, la fonte, sont exposés à des altérations chimiques partielles, spécialement au contact des eaux salines et de l'eau de mer.

La désagrégation du métal pénètre parfois à une grande profondeur, sans cependant se manifester extérieurement d'une façon très apparente ; souvent même l'éclat métallique est conservé, de telle sorte que l'on ne reconnaît cette altération que lorsqu'elle est déjà très profonde et a enlevé au métal toute sa résistance.

Voici les analyses d'une pièce en laiton qui a été altérée dans certaines parties :

	Partie saine	Partie altérée
Cuivre	61,5	69,9
Zinc	38,3	29,8

Il y a donc eu une dissolution de zinc.

Dans certains cas analogues, les résidus arrivaient à renfermer 99 0/0 de cuivre. La majeure partie du zinc qui reste dans la partie altérée est d'ailleurs à l'état d'oxyde, tandis que le cuivre a conservé l'état métallique.

Dans la fonte, le fer a été dissous, comme le montre l'analyse suivante :

Fer	26,6
Graphite	12,7
Silicium	1.6
Phosphore	5,7

L'élévation considérable de la teneur en graphite et en phosphore montre que ces deux éléments ont résisté à l'attaque chimique, tandis que le fer a disparu.

Le bronze ordinaire à 10 ou 12 0/0 d'étain résiste en général beaucoup mieux que les laitons.

L'Amirauté a essayé un alliage désigné sous le nom de laiton maritime (*naval metal*), qui a la composition suivante :

Cuivre	62
Zinc	37
Étain	1

L'expérience a montré que sa résistance à l'action de l'eau de mer était considérable. On obtient encore des résultats plus satisfaisants en augmentant la proportion de cuivre, et le métal suivant convient très bien pour la fabrication des tubes :

Cuivre	78
Zinc	21
Étain	1

Des expériences faites par les soins du Lloyd's Register de Liverpool et de Portsmouth ont montré l'avantage de ces compositions. Le métal Muntz ordinaire et le même métal additionné de 1 0/0 d'étain ont été exposés à l'action de l'eau de mer, après avoir été appliqués les uns sur des planches en bois, les autres sur des feuilles de cuivre. Au bout de huit mois d'immersion, l'épaisseur du métal altéré a été moitié moindre avec l'alliage renfermant de l'étain. On a reconnu, en outre, que les métaux appliqués sur le cuivre se sont altérés beaucoup plus rapidement.

L'ensemble des études faites semble montrer que cette altération particulière des métaux se produit spécialement dans les alliages non homogènes, c'est-à-dire formés de plusieurs constituants, comme c'est le cas du métal Muntz.

Les conclusions du mémoire sont les suivantes :

L'usure chimique est plus fréquente dans les métaux formés de plusieurs constituants que dans les métaux homogènes;

elle est due à des actions moins énergiques que celles qui provoquent la corrosion proprement dite. Elle consiste dans l'enlèvement d'un seul des constituants de l'alliage, tandis que la corrosion résulte de l'attaque simultanée de tous les constituants. L'usure chimique et la corrosion peuvent résulter soit d'actions chimiques seules, soit le plus souvent de la combinaison d'actions chimiques et électro-chimiques. Les piqûres, les perforations ou corrosions, lorsqu'elles sont intenses semblent souvent être dues à la ségrégation d'impuretés rassemblées en un point du métal ; mais elles peuvent aussi, dans certaines conditions particulières, être le résultat d'irrégularités de la surface ou de la structure, donnant naissance à une irrégularité dans l'action des courants électriques.

Pour le laiton exposé à l'eau de mer, l'addition d'étain amène une préservation très nette, tandis qu'au contraire le plomb et le fer augmentent l'altération.

Les expériences faites sur l'action du courant électrique montrent que des courants même très faibles peuvent amener à la longue des corrosions ou des usures profondes. Tous les soins doivent donc être pris pour éviter la formation de semblables courants, et, en particulier, les câbles électriques placés dans le voisinage des appareils doivent être isolés avec soin.

Quand il est impossible d'éviter complètement les actions galvaniques par le fait de la présence simultanée des différents métaux dans un même électrolyte, il faut neutraliser le courant produit en introduisant des plaques de zinc dans des points convenables du circuit.

Une note additionnelle donne les résultats d'expériences relatives à l'action du courant électrique. Différents alliages de cuivre furent soumis à l'action d'un courant de 0,01 ampère pendant soixante-douze heures et de 0,001 ampère pendant deux cent quatre-vingt-huit heures.

Les poids de métal enlevé sur des surfaces de 40 centimètres carrés furent dans le premier cas compris entre 1 et 2 grammes et dans le second cas entre 1/2 et 1 gramme. Tantôt l'action de la corrosion fut uniforme, tantôt au contraire elle se porta

sur des points déterminés. Cela a été le cas en particulier du métal Muntz, dont le constituant le plus riche en zinc a été seul attaqué en laissant une éponge métallique de cuivre.

La lecture du mémoire que nous venons de résumer a été suivie d'une discussion fort intéressante par l'abondance, la précision et la portée pratique des renseignements qui ont été fournis. Il ne sera possible d'en donner ici qu'un extrait très sommaire.

M. Weston rappelle que l'altération du métal Muntz a été observée pour la première fois par l'Amirauté anglaise il y a vingt-cinq ans. Des pièces de métal de 75 millimètres de diamètre avaient perdu les deux tiers de leur résistance à la traction, la partie superficielle altérée ne présentant plus qu'une résistance égale au 1/10 de celle de la partie saine et cependant, à la vue, l'altération produite n'était guère visible.

Le Lloyd pose aujourd'hui en principe que le doublage des navires en métal Muntz doit être renouvelé tous les cinq ans. L'Amirauté prescrit l'emploi d'un métal additionné de 1 0/0 d'étain, comme cela a été signalé par l'auteur du rapport. De même, le bronze au manganèse employé pour les hélices est additionné de 1 0/0 d'étain. Ce bronze manganésé est, en réalité, du métal Muntz additionné d'une petite quantité de fer pour augmenter sa résistance.

Les phénomènes électro-chimiques résultant du voisinage de métaux différents semblent avoir une importance bien plus grande que la présence simultanée dans l'alliage de deux constituants différents; en effet les mêmes hélices, qui se conservent très longtemps dans les navires en fer, s'altèrent beaucoup plus rapidement sur les navires en bois doublés de cuivre.

Les condenseurs à surfaces sont, en laissant les tubes de côté, faits avec un métal Muntz, c'est-à-dire avec du laiton forgeable à chaud. Pour prolonger la durée du métal, on ne se contente pas de l'addition de 1 0/0 d'étain, on y fixe encore des pièces de fer, de façon à le protéger contre les actions électro-chimiques, le fer étant le métal électro-négatif et s'altérant par conséquent seul.

Un fait assez curieux montre cette influence des phénomènes électro-chimiques : une pièce de doublage tracée avec une pointe d'acier et restée pendant quarante années immergée à l'eau de mer, montrait en relief la ligne tracée par l'outil. La compression produite par cette action mécanique avait rendu cette partie du métal plus électro-négative et l'avait ainsi protégée. De même, les tôles de fer qui n'ont subi aucun travail mécanique se corrodent uniformément, tandis que, si elles ont été limées ou rabotées, certaines parties restent intactes, pendant que les autres s'attaquent rapidement.

Les tubes des condenseurs sont faits en laiton à 70 0/0 de cuivre et 1 0/0 d'étain; ils résistent d'une façon satisfaisante; mais parfois quelques tubes de condenseur fournis à l'Amirauté se sont rapidement détruits, et l'on a reconnu alors que, par suite d'une négligence des ouvriers, des tubes en métal Muntz, couramment employés dans le commerce, avaient été substitués à ceux en métal spécial demandés par l'Amirauté anglaise. L'altération des tubes ne semble pas pouvoir être attribuée aux impuretés en raison des garanties prises au sujet de la qualité des métaux. Pour juger de la qualité des laitons servant à faire les tubes, l'Amirauté fait l'essai suivant :

Le métal est fondu avec une quantité de zinc suffisante pour produire le métal Muntz, c'est-à-dire 61 0/0 de cuivre, contre 39 0/0 de zinc. La simple cassure permet de reconnaître de suite la présence de quantités d'antimoine ne dépassant pas 0,01 ou d'arsenic ne dépassant pas 0,05.

M. Houghton attribue une importance capitale aux impuretés des alliages.

Les brasures des tubes de cuivre résistent quelquefois longtemps, tandis que d'autres fois leur destruction est très rapide. Cette différence tient à la pureté plus ou moins grande de la brasure. M. Houghton pense qu'à côté des phénomènes électrochimiques il faut se préoccuper des phénomènes thermo-électriques résultant des différences importantes de températures qui peuvent exister d'un point à l'autre d'un condenseur.

M. Tomlinson appuie les observations de M. Wetson au

sujet de l'absence d'impuretés dans les tubes employés par l'Amirauté. Il conteste également la présence de l'alliage cristallisé, signalée par les auteurs du rapport. Ses expériences personnelles lui ont montré qu'on ne trouvait jamais ces cristaux dans le cuivre ou le laiton fondus. Il reconnaît que, s'il est utile d'employer des métaux très purs, cela ne donne pas pourtant une garantie absolue.

M. Darley fait remarquer que les accidents signalés avec le métal Muntz ne se produisaient pas autrefois. Il montre des pièces de métal absolument saines, provenant d'un navire ayant séjourné vingt ans dans le port de Sydney, tandis qu'aujourd'hui la destruction se produit parfois en quelques années. Il serait porté à croire que l'emploi général du cuivre électrolytique, autrement dit du cuivre trop pur et se combinant mal avec le zinc, est la cause des insuccès actuels [1].

M. Dewrance, à la suite d'expériences faites sur des tubes en laiton et de l'impossibilité de les rendre étanches aux fortes pressions, a été conduit à vérifier leur hétérogénéité par les phénomènes d'attaque chimique. Après bien des essais, il a reconnu que le métal le plus convenable pour la fabrication des tubes était l'alliage de cuivre et d'étain renfermant 5 0/0 de ce métal.

M. Bertram Blount combat énergiquement l'ancienne théorie que M. Darley cherche à faire revivre relativement aux avantages des métaux impurs. Il a eu l'occasion d'analyser comparativement les laitons provenant de Sydney et s'étant altérés avec des vitesses inégales. A son grand étonnement, il a constaté que le métal Muntz anciennement fabriqué est aussi pur que celui que l'on obtient aujourd'hui par des procédés métallurgiques cependant plus perfectionnés. Il insiste sur un point trop souvent passé sous silence : la présence de petites fissures est bien souvent la cause des accidents attribués à la corrosion. On peut les examiner avec un faible grossissement au microscope.

1. Nous ne voyons pas comment la trop grande pureté du cuivre pourrait nuire à la formation de l'alliage cuivre-zinc.

M. Longridge a mesuré la force électromotrice développée entre différentes plaques de cuivre ou de laiton placées dans des dissolutions convenables. Entre des feuilles de laiton semblables, il a pu obtenir des différences de force électromotrice de 0,2 volt, tandis qu'entre des feuilles de cuivre il n'a pu dépasser 0,05 volt. En tenant compte de la résistance de l'électrolyse, il a pu calculer que l'action de ce courant aurait pu, en se localisant dans quelques points, amener des perforations complètes en l'espace de quelques semaines. Il pense qu'indépendamment de l'action galvanique il y a à tenir compte des sels ammoniacaux dérivant des matières organiques contenues dans les eaux.

M. Sinclair a étudié l'altération de pièces métalliques de natures différentes réunies ensemble et immergées dans de l'eau salée. L'électrolyte employé était une solution concentrée de sel marin chauffé à la température de 50°. Un morceau de laiton réuni à du cuivre a perdu en quatre-vingt-dix jours 10 0/0 de son poids, comprenant 23,8 de zinc primitif et seulement 2,3 0/0 du cuivre. Un morceau de fer réuni à du laiton dans les mêmes conditions a perdu 5 0/0 de son poids. Enfin un morceau du même fer, pris isolément, n'a perdu que 2 1/2 0/0 de son poids dans le même temps.

D'autre part, M. Diegel a exposé, sur le même sujet, dans le *Stahl und Eisen* (1904), un travail fort intéressant que la *Revue de Métallurgie* (septembre 1904) a résumé comme suit :

I. *Alliages de nickel et de cuivre forgeables.* — On a choisi deux des alliages les plus utilisables au point de vue de leur résistance, de leurs allongements et de leur facilité de travail: l'un, à 42; l'autre, à 20 0/0 de nickel. Ils peuvent être forgés au rouge blanc, comme l'acier doux, et se travaillent facilement à froid avec les outils tranchants. L'essai de résistance à l'eau de mer a été fait sur les barres de 100 millimètres de longueur utile, 250 millimètres de longueur totale et $8 \times 9 = 72$ millimètres carrés de section. Ces barres furent rivées à des plaques de compositions diverses, dont le contact devait servir pour les recherches, et chaque plaque fut suspend au

moyen d'un fil à un pont de bois dans le port de Kiel. Les essais des barres d'alliages nickel-cuivre I et II ont porté sur des plaques de cuivre électrolytique, bronze d'étain-fer, afin d'étudier l'action à l'eau de mer de ces alliages sur eux-mêmes ou sur les autres métaux et alliages. On a aussi fait des essais avec des barres de bronze d'étain, de bronze au fer et de bronze d'aluminium sur plaques d'alliages de nickel et de cuivre. Chaque barre était mesurée, pesée avant et après l'immersion. Voici les résultats de ces mesures après vingt-cinq mois un quart d'immersion.

BARRES	PLAQUES	(NiCu) I à 42 0/0 Ni, 0,4 Fe, 0,4 Mn.		(NiCu) II à 20 0/0 Ni, 2,5 Fe	
		PERTE DE POIDS par millimètre carré de surface en grammes	RÉSISTANCE FINALE de la barre Résistance initiale = 100 0/0	PERTE DE POIDS par millimètre carré de surface en grammes	RÉSISTANCE finale de la barre Résistance initiale = 100 0/0
NiCu	NiCu	4,55	98,4	3,90	96,3
—	Cu	2,60	99,0	3,33	96,6
—	Bronze Sn	2,41	98,5	0,72	99,8
—	Fe	0,00	100,0	0,00	100,0
Bronze Sn	NiCu	18,11	89,7	19,80	95,0
Laiton Fe	—	34,20	15,0	35,85	20,0
Bronze Al-Fe	—	16,00	84,8	12,81	83,5

Le bronze à l'étain contenait :

Cu 89
Sn 11

Le laiton au fer contenait :

Cu 57
Zn 42
Fe .... 0,5 à 1

Le bronze à l'aluminium et au fer contenait :

Cu 88
Al 7
Si 1,5
Fe 3
Zn 0,5

Le cuivre était électrolytique et presque pur.

Comparaison des propriétés de résistance des alliages de nickel et de cuivre à l'eau de mer avec celle de l'acier doux. — Les essais mécaniques ont donné :

RÉSISTANCE EN KILOGRAMMES PAR MILLIMÈTRE CARRÉ

	LIMITE D'ÉLASTICITÉ	LIMITE DE RUPTURE	ALLONGEMENT DE RUPTURE 0/0
NiCu I	24	48	34
NiCu II	31	49	29
Acier pour essieux de wagons	25 à 30	42,5 à 55	20
Acier Martin pour manivelles et arbres à vis de navires	22 à 25	40 à 45	20

Résultats. — Les deux alliages de nickel et de cuivre se comportent à peu près également à l'eau de mer : il résistent très bien. Si l'alliage nickel-cuivre est réuni à lui-même ou à du cuivre, l'alliage à 42 0/0 de nickel est attaqué un peu plus également que l'alliage à 20 0/0. Avec le bronze à l'étain, c'est l'inverse. Les deux alliages de nickel et de cuivre souffrent moins à l'eau de mer, s'ils sont en contact avec d'autres métaux que s'ils sont seuls. La protection par le cuivre et le bronze à l'étain n'est pas considérable ; par contre, le fer empêche complètement la corrosion ; les barres d'alliages nickel-cuivre rivées au fer sont demeurées intactes après trente-deux mois d'immersion.

Les autres alliages de cuivre, en contact avec l'alliage nickel-cuivre sont fortement attaqués. Le laiton au fer fut complètement corrodé après trente-deux mois ; après dix-huit mois et demi l'âme seule de la barre reste intacte.

II. *Influence du nickel dans les alliages de cuivre et de zinc.* — Les essais ont porté sur des alliages cuivre-zinc avec ou sans nickel mis en contact avec le cuivre dans l'eau de mer. Les surfaces en contact étaient dans les rapports 1/4, 3 1/5, 5.

Les recherches ont duré de douze à seize mois.

Les alliages de cuivre riches en zinc, en contact avec du

cuivre ou des alliages riches en cuivre sont attaqués, à 24 0/0 Zn, presque autant que les autres alliages ; le cuivre et le zinc passent plus ou moins également dans la dissolution ; à 28 0/0 et plus, la corrosion est sensiblement plus grande, par suite de la dissolution simultanée de zinc de l'alliage, qui diminue beaucoup la capacité de résistance. La résistance des alliages riches en zinc est augmentée par addition de 15 0/0 Ni ; avec une teneur en zinc de 40 0/0, la dissolution de zinc par le courant est encore réduite à un minimum.

	SUSPENDU EN CONTACT AVEC	PERTE EN : SECTION 0/0	PERTE EN : POIDS par millim. car. de surface	RÉSISTANCE INITIALE = 100 0/0
Fil (Neu Silber) à 60,5 Cu, 24 Zn, 17 Ni, 0,5 Fe :	Cu à 0,6 0/0 As		0,87	97
Maillechort de moulage à 45,5 Cu, 39 Zn, 15 Ni, 0,5 Fe :	Cu à 0,6 0/0 As	0,78	2,12	98,3
Maillechort de moulage à 75,5 Cu, 24 Zn, 0,5 Fe :	Cu à 0,6 0/0 As	0,70	2,08	94,2
Laiton de moulage à 71,2 Cu, 28,30 Zn, 0,5 Fe :	Cu à 0,6 0/0 As	0,37	6,04	90,7
Laiton au fer à 57 Cu, 42 Zn, 0,5 à 1 Fe :	(NiCu) à 20 0/0 Ni	0,66	17,29	61,0

Malheureusement une amélioration de la résistance à l'eau de mer pour les laitons forgeables par addition de nickel n'est guère possible, car ces alliages ne sont plus forgeables[1].

III. *Influence de l'eau de mer sur les métaux suspendus et isolés les uns des autres et protection des alliages de cuivre par*

1. Cette opinion est en partie erronée.

le fer. — On fit les expériences avec des plaques travaillées sur toutes les faces suspendues dans l'eau de mer de seize à vingt-cinq mois. La perte de poids, après douze mois, a été maxima pour l'acier forgé qui renfermait 0,07 Ni; 0,44 Mn; 0,01 Si; 0,05 C; 0,07 P; 0,06 S; 0,08 Cu (9^{gr},015 par mètre carré), et minima pour le cuivre électrolytique refondu (0^{gr},563 par mètre carré); l'alliage cuivre-nickel à 42 0/0 a donné 2^{gr},162; l'alliage cuivre-nickel à 20 0/0 Ni a donné 1^{gr},848; et le bronze d'aluminium (à 91 Cu et 9 Al) forgé a donné 0^{gr},600. Tous les alliages de cuivre en contact avec les plaques de fer ont été presque complètement protégés, les surfaces de contact étant dans le rapport de 1/2 à 1/9. Le zinc sert pour protéger le fer; il convient également pour les alliages de cuivre.

IV. *Influence de l'eau de mer sur le cuivre pur et impur travaillé à chaud ou à froid.* — Le cuivre pur (à 0,005 As) est fortement endommagé, quand il est en contact avec le cuivre impur (à 0,600 As et 0,063 Sb). Ce dernier étant peu atteint, la perte de poids était treize fois plus forte pour le premier. Un vapeur cuirassé avec du cuivre pur à 0,022 As fut endommagé au bout de six mois, tandis qu'un autre blindé avec du cuivre impur (à 0,24 As et 0,20 Ni) était en bon état au bout de dix ans. On fit ensuite des essais sur des cuivres électrolytiques fondus ou non; il n'y eut pas de différence, même avec de fortes amenées d'air atmosphérique dans de l'eau de mer carbonisée. Par contre, le cuivre électrolytrique en contact dans de l'eau de mer avec du cuivre arsénieux a montré des corrosions.

Les plaques de cuivre oxydées sont rongées, parce que l'oxyde constitue la cathode d'un élément galvanique. Le cuivre travaillé au rouge a souffert deux fois plus que le cuivre travaillé à froid.

Le zinc protège le cuivre pendant peu de temps; après la décomposition, le cuivre est attaqué d'autant plus fort. Le contact métallique avec le fer protège le cuivre contre la corrosion, mais incomplètement.

V. *Corrosion des tuyaux de cuivre sur les navires.* — Ces

conduites servent au transport de l'eau de mer et sont rapidement hors d'usage. Les expériences ont donné les résultats suivants :

a) Le cuivre pur est plus fortement corrodé que le cuivre impur;

b) Le cuivre ordinaire est moins atteint que le cuivre électrolytique le plus pur;

c) Une forte teneur du cuivre en oxydule facilite peut-être l'attaque par l'eau de mer;

d) Une forte teneur en arsenic (0,5 0/0) rend le cuivre résistant à l'eau de mer.

Les produits d'oxydation du cuivre, obtenus par l'entrée d'air atmosphérique dans les conduites, forment avec celui-ci un élément galvanique où le cuivre forme l'anode et se dissout.

La corrosion est peut-être facilitée, dans les tuyaux d'aspiration des pompes de condenseurs, par le courant électrique que produit la rotation des roues à ailettes dans l'eau de mer.

On a, en effet, démontré que la rotation d'un propulseur de navire dans l'eau de mer produit un courant électrique.

D'après le professeur Cohen, la protection des conduites en cuivre par un courant électrique extérieur, pour les tuyaux de condenseurs, n'aurait de succès que si on pouvait utiliser comme anode une tige métallique isolée longeant la conduite.

VI. *Influence du phosphore et du nickel dans le fer au point de vue de la corrosion à l'eau de mer.* — A. *Influence du phosphore.* — Les recherches de Baucke, à Amsterdam (*Baumaterialienkunde*, n° 23, 1899; *St. u. Ei.*, 1900, n° 5, p. 260), ont montré que les tubes de locomotives en fer à 0,10 0/0 P se comportaient bien à l'eau de mer, tandis que les tubes à 0,02 0/0 P étaient fortement rongés. C'est peut-être une explication des corrosions si rapides des tubes, plaques, etc., de chaudières en certains points déterminés. Comme le fer soudé est généralement plus riche en P que l'acier, il sera rongé moins vite dans les chaudières. La question est compliquée, et on s'explique pourquoi les avis des hommes du métier soient

si différents sur ce sujet. Howe et Rudeloff ont trouvé que l'acier était aussi fortement corrodé que le fer, tandis que H. Otto n'a pas trouvé de différences sensibles.

1° *Recherches préliminaires.* — Ces expériences ont été faites sur une petite échelle; on a cherché si deux qualités d'acier à teneurs différentes en phosphore produisent un élément galvanique dans l'eau de mer. On a choisi deux aciers à faible teneur en C : l'un, acier Martin, à 0,006 0/0 P, l'autre, acier Bessemer, à 0,098 0/0 P. La composition et les propriétés mécaniques étaient les suivantes :

	ACIER MARTIN	ACIER BESSEMER
C	0,09	0,06
P	0,006	0,098
S	0,04	0,05
Si	0,02	0,01
Mn	0,17	0,40
Ni	0,05	0,04
Cu	0,08	0,09
Limite élastique	22,4	28,5
Rupture	34,2	44,9
Allongement de rupture	32,7	26,8

On avait rivé ensemble deux plaques de $300 \times 100 \times 7^{mm},5$ des deux qualités d'acier. Puis on a essayé avec une des plaques de suspension en acier Martin portant des barres rivées en acier Bessemer, l'autre plaque ayant ses métaux disposés d'une façon inverse; les plaques et les barres étaient bien rabotées sur toutes leurs faces; quatre échantillons sont restés dix-sept mois dans l'eau de mer, les fils de suspension étaient isolés des pièces d'acier. La plaque en acier Martin, peu phosphoreux, a plus souffert que l'autre; elles ont perdu respectivement $10^{gr},8$; $5^{gr},9$; $13^{gr},41$ et $3^{gr},36$ par le courant galvanique.

L'influence du phosphore est donc très nette; l'élément le plus phosphoreux forme la cathode qui est plus ou moins

garantie, tandis que l'autre élément, moins phosphoreux, formant l'anode, est corrodé à un très haut degré.

2° *Expériences plus étendues.* — On a cherché à vérifier les résultats précédents sur un plus grand nombre d'échantillons.

a) On a essayé des aciers avec une teneur variant de 0,01 à 1,08 0/0 de phosphore, ces derniers étant tellement cassants que la résistance à la rupture n'a pu être exactement déterminée.

b) Les essais furent faits en plongeant les éprouvettes dans la mer, ou dans de grands récipients en fer remplis d'eau de mer qu'on renouvelait trois fois par semaine; l'expérience a duré seize mois dans les mêmes conditions que plus haut, et en variant les surfaces de contact des plaques entre elles, ainsi que les métaux constituant ces plaques. Les résultats de ces expériences sont consignés d'une façon très détaillée dans des tableaux du mémoire original.

c) *Principaux résultats.* — Avec deux plaques à teneurs différentes en phosphore, mises en contact métallique dans un rapport de 1/1, la perte de poids par mètre carré de la plaque d'acier pauvre en phosphore est trois à six fois plus grande que la perte de la plaque riche en phosphore. La perte de poids dans l'eau de mer du port a été double de la perte dans les bassins. Avec des plaques à demi plongées et isolées les unes des autres, la corrosion décroît quand la teneur en phosphore croît.

L'influence des surfaces de contact est très variable.

B. *Influence du nickel.* — Mêmes expériences que précédemment pendant seize mois.

a) On a employé des qualités d'acier à 6 et 30 0/0 de nickel. Pour établir l'influence de ces aciers, on a choisi le même acier Martin, qui a été essayé avec les plaques très phosphoreuses.

On a également essayé de l'acier à 1 0/0 de phosphore.

	ACIER au Ni à 30 0/0	ACIER au Ni à 6 0/0	ACIER MARTIN	ACIER phosphoreux
Cu	0,47	0,38	0,47	0,18
Si	0,37	0,25	0,32	0,32
Mn	0,64	0,25	0,67	1,04
P	0,02	0,021	0,062	1,08
S	0,029	0,02	0,046	1,031
Cu	0,13	0,075	0,083	0,072
Ni	29,68	6,14	0,02	—
Limite élastique	32	34	50	—
Rupture	65	75	82	—
Allongement de rupture	28	19	14	0

b) *Résultats.* — L'acier au nickel en contact à l'eau de mer avec des aciers exempts de nickel et très phosphoreux a été presque complètement garanti; l'acier à 30 0/0 de nickel est garanti par l'acier à 6 0/0 nickel.

Si l'acier au nickel est en contact avec de l'acier à faible teneur en nickel, ou exempt de nickel, le premier est presque complètement protégé; par contre, l'autre est attaqué d'autant plus énergiquement. Avec une différence de 23,5 à 30 0/0 de nickel, le métal plus riche reste inattaqué; les surfaces restent lisses après seize mois comme au premier jour.

Dans les mêmes conditions, l'attaque à la mer a été environ quatre fois plus forte que dans les bassins, bien que l'eau fût souvent renouvelée. Dans les plaques à demi-plongées, toutes isolées les unes des autres, la teneur en nickel a influé considérablement sur la corrosion. Les pertes sont les suivantes :

Acier Martin dur à 0,062 0/0 P	60
— au Ni à 6 0/0	39,65
— — à 30 0/0	16-26,6

ou bien

Acier doux à moins de 0,01 0/0 P	100
— — Ni à 6 0/0	55,7
— — Ni à 30 0/0	22,9

C. *Force électromotrice produite par le contact à l'eau de mer de deux qualités d'acier Martin et Bessemer.* — Entre deux

qualités d'acier à teneurs différentes en phosphore, la force électromotrice est faible ; entre acier pauvre en nickel et acier riche en nickel elle est notable.

α) Plus la teneur en phosphore est élevée plus l'acier se rapproche du cuivre dans la série galvanique.

β) La plus petite différence en phosphore, de 0,05 à 0,06 par exemple, a une influence très grande sur la différence du potentiel. Au-dessus de 0,1 0/0 de phosphore, la différence entre l'acier et le zinc croît très peu.

γ) Avec des teneurs croissantes en nickel, la différence de potentiel entre l'acier et le zinc croît notablement.

δ) La différence dans les pertes de poids de deux métaux en contact à l'eau de mer est d'autant plus grande que la différence de potentiel est plus considérable.

ε) De deux qualités d'acier en contact, la plus fortement corrodée est celle qui, dans la série galvanique, se rapproche le plus du zinc.

ζ) Dans les plaques isolées, à demi-plongées dans l'eau de mer, la perte de poids décroît d'autant moins que la différence de potentiel entre l'acier et le zinc est plus grande.

D. *Règles pratiques qui se dégagent de ces expériences.* — a) *Présence du phosphore dans l'acier.* — Si la forte teneur en phosphore diminue la corrosion dans l'eau de mer, il faut, néanmoins, en considération de la qualité du métal, de la ténacité par exemple, se limiter à une teneur en phosphore aussi faible que possible. La corrosion totale d'une chaudière à vapeur, d'un corps de navire, etc., ne peut donc être diminuée par le choix d'un métal à teneur déterminée en phosphore. Mais il sera désormais possible de parer à la destruction rapide de certaines parties (plaques, tuyaux, etc.), si on tient compte de la teneur en phosphore comme il suit :

α) Toutes les parties d'un corps de navire, d'une chaudière, etc., qui sont en contact avec l'eau de mer devront être construites en acier à teneur aussi constante que possible en phosphore; il faut veiller à ce que les organes de faible surface soient au moins aussi phosphoreux que les autres.

β) Pour les chaudières, il serait avantageux de prendre tout le métal dans la même charge ou bien dans plusieurs dont la teneur en phosphore serait rigoureusement constante.

γ) S'il s'agit de protéger certains organes, les tubes à feu d'une chaudière par exemple, il serait avantageux de les choisir en fer un peu plus phosphoreux que les autres organes. Si on choisit ce moyen pour certaines parties d'une chaudière, il faut compter que les autres surfaces seront plus fortement atteintes qu'avec une teneur en phosphore constante dans tous les points de la chaudière; ce sera le cas si la surface de la pièce plus phosphoreuse est relativement grande. Il sera donc plus facile de protéger quelques tuyaux de la chaudière, de cette façon, que de les protéger tous.

b) *Emploi du nickel.* — α) Si l'acier au nickel doit être utilisé en contact avec de l'acier exempt de nickel, dans les parties qui doivent séjourner longtemps dans l'eau de mer, il faut calculer la teneur en nickel aussi basse que possible, de façon à ce que l'acier sans nickel ne soit pas trop fortement atteint. Si les deux surfaces sont en contact dans le rapport 1/1 en prenant l'acier à 6 0/0 nickel, l'acier sans nickel sera presque exclusivement attaqué, environ une fois et demie plus fort que s'il était employé seul. Dans les torpilleurs avec cuirasse extérieure à 25 0/0 nickel, les pièces d'arrière, en acier sans nickel, sont rapidement corrodées, bien que le corps du bâtiment soit recouvert d'une couche de peinture préservatrice.

β) S'il faut bien protéger une partie construite en acier et si la surface correspondante est relativement petite, il est à recommander d'employer l'acier au nickel à 30 0/0. La partie atteinte se corrode peu, et on n'a pas à craindre une action trop énergique sur l'acier exempt de nickel.

γ) Si, par contre, la surface à protéger est relativement grande, la partie exempte de nickel qui se trouvera en contact sera fortement corrodée.

δ) L'emploi de l'acier au nickel à 30 0/0 dans l'eau de mer, en contact avec tous les métaux qui se trouvent près du cuivre

dans la série galvanique, est à éviter. Un tel contact produit dans l'acier à 30 0/0 nickel, fonctionnant comme anode, des corrosions irrégulières et très profondes.

CONCLUSIONS

En résumé, les laitons spéciaux actuellement utilisés par l'industrie sont des alliages très complexes contenant, outre du cuivre et du zinc, de l'étain, du manganèse, de l'aluminium, du fer et quelquefois des traces de phosphore.

L'influence de ces corps est très diverse :

L'étain joue le même rôle que le zinc, mais avec une intensité plus grande : 1 0/0 Sn jouant le même rôle que 1,5 0/0 Zn.

C'est dire que l'étain permettra la formation du constituant β, avec des teneurs en cuivre beaucoup plus élevées que lorsqu'on est en présence d'un alliage cuivre-zinc.

L'étain, mis en petite quantité, augmente la charge de rupture, tandis que les allongements sont diminués.

Le manganèse joue à peu près le même rôle que 0,5 de zinc.

Il augmente les allongements et la charge de rupture lorsqu'il n'atteint pas 2 0/0. Au-delà il augmente très nettement la charge de rupture, mais il diminue les allongements.

L'aluminium joue un rôle tel que 1 0/0 de ce métal équivaut à 3,5 0/0 de zinc.

Ceci explique très bien qu'un laiton à 70 0/0 de cuivre contenant 5 0/0 d'aluminium puisse être laminé à chaud. Il renferme bien, en effet, les grands cristaux caractéristiques des laitons forgeables à chaud.

Il augmente la charge de rupture et la limite élastique ; il agit de même sur les allongements, quand son pourcentage n'atteint pas 2 0/0 et que Cu = 60 0/0.

Le fer augmente la charge de rupture et paraît diminuer les allongements.

En résumé, les laitons spéciaux sont des produits tels que l'on crée, par additions de corps généralement plus actifs que

le zinc (aluminium, étain, etc.) et agissant dans le même sens, le constituant β, mais cela en présence d'une solution α plus riche en cuivre que les solutions des laitons à constituant β ordinaire. On pourra donc avoir simultanément la charge de rupture élevée caractéristique des laitons renfermant le constituant β et les beaux allongements de laitons à solution α[1].

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE X

Bertin, *les Machines marines* (*Essais sur divers laitons*).

Charpy, *Bulletin de la Société d'Encouragement*, et *Contribution à l'étude des Alliages métalliques* (*Laitons divers*).

Commission des Etats-Unis, *Rapport spécial* (*Id.*).

Diegel, *Stahl und Eisen*, 1904 (*Résistance des Alliages à l'eau de mer*); — *Revue de métallurgie* (extraits), septembre 1904 (*Id.*).

Freundler, *Congrès des Mines et de la Métallurgie*, 1889 (*Métal Delta*).

Guillet, *Revue de Métallurgie*, 1905 (*Divers laitons ternaires*); — *Génie civil*, XLVII, 9, 1905 (*Id.*).

Guillemin, *Commission des méthodes d'Essais*, 1894 (*Laitons divers*).

Hiorns, *les Alliages métalliques*, p. 207 (*Id.*).

Knab, *Traité des Alliages*, p. 190.

H. Le Chatelier, *Bulletin de la Société d'nncouragement* (*Essais sur le métal Delta*).

Mac Intyre, *Rapport à the Balloom Society*, 15 octobre 1889 (*Métal Delta*).

Milton et Larke, *Institute of Civil Engineering* (*Résistance des Alliages à l'eau de mer*); — *Revue de Métallurgie* (extraits), mai 1905 (*Id.*).

Nicolardot, *le Vanadium* (Collection Léauté) (*Laitons au Vanadium*).

Société du métal Delta, *Notice spéciale*, Paris, 1889 et 1890 (*Métal Delta*).

Tetmejer, *Schweizerisches Gewerbeblatt* (*Id.*).

Thurston, *Alloys Brasses and Bronzes*, John Wiley and Sons, New-York, 1903 (*Laitons divers et surtout laitons à l'étain*).

Weiller (L.), *Congrès des Mines et de la Métallurgie*, 1889 (*Laitons divers*).

1. Voir l'*Appendice*.

CHAPITRE XI

ALLIAGES DE CUIVRE : CUIVRE-ALUMINIUM BRONZES D'ALUMINIUM

I. — ÉTUDE THÉORIQUE

Les alliages de cuivre et d'aluminium sont de ceux qui paraissaient le mieux étudiés. Cependant, au moment où nous avons recherché l'influence de la trempe sur les propriétés mécaniques des alliages cuivre-étain, en nous appuyant sur le remarquable travail de MM. Heycock et Neville, nous nous sommes proposé d'étudier le même phénomène dans les alliages de cuivre et d'aluminium.

Nous avons alors repris l'étude complète de ces alliages.

Courbe de fusibilité. — La courbe de fusibilité (liquidus) des alliages aluminium-cuivre a été déterminée par M. H. Le Chatelier. Cette courbe (*fig.* 179) comporte une droite AB, une branche BCD accusant un maximum en C, une droite DE, une autre branche EFG comportant un autre maximum F et une droite GH. Le premier maximum correspond à l'alliage qui aurait pour formule Cu^3Al. Au maximum E correspond à peu près le composé Al^2Cu. M. H. Le Chatelier a fait remarquer qu'il n'y avait pas une coïncidence absolue.

En reprenant la détermination des points de fusion, nous avons retrouvé des résultats identiques ; la seule différence

importante réside dans ce que la droite A'B paraît avoir une inclinaison beaucoup moindre ; à quelques degrés près, tous

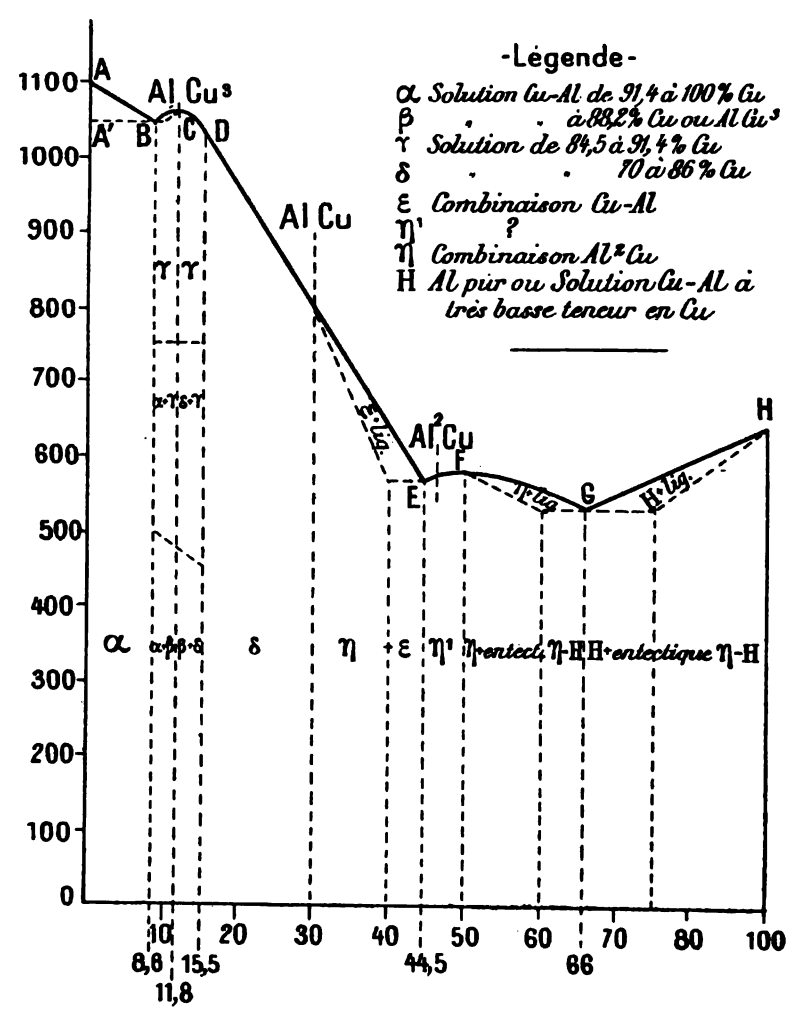


Fig. 179. — Diagramme des alliages cuivre-aluminium.

les alliages correspondant à la branche A'B fondraient à la même température, très voisine de celle du cuivre (1.035° et non 1.080°, suivant l'échelle prise par M. H. Le Chatelier).

Nous avons cherché à déterminer la courbe du solidus. A

cet effet, nous avons étudié, d'une part, les courbes de solidification des différents alliages et, d'autre part, la micrographie d'alliages trempés à des températures décroissantes à partir du point de fusion.

Les résultats que nous avons obtenus manquent assurément de précision et nous ne saurions les donner comme certains. Très souvent la fin de la fusion n'est pas nette ; il en est de même de l'apparition du liquidus au microscope.

Toutefois nous croyons que la forme du liquidus s'écarte peu de celle que nous donnons ; nous pouvons affirmer que les alliages suivants se solidifient en même temps dans toute leur masse :

1° Dans le voisinage immédiat de 66 0/0 d'aluminium ;

2° Dans le voisinage de 46 à 48 0/0 d'aluminium ;

3° Dans le voisinage de 30 0/0 d'aluminium ;

4° Dans le voisinage de 11 à 12 0/0 d'aluminium.

Enfin les alliages de la droite AB semblent bien n'avoir qu'un seul point de solidification.

Points de transformation. — M. Breuil a présenté, il y a quelques mois, à la section française de l'Association internationale des Méthodes d'essais, puis à l'Académie des Sciences une note à laquelle nous avons répondu (séance de janvier de l'Association des Méthodes d'essais). Dans cette note, M. Breuil signale qu'un alliage dont il ne donne pas la composition, mais qui est principalement formé de cuivre et d'aluminium, fond entre 1.010 et 1.030° et présente un point singulier entre 670 et 730°.

En étudiant les alliages cuivre-aluminium au moyen du galvanomètre double de M. H. Le Chatelier (méthode de M. Saladin), nous sommes arrivé aux résultats suivants :

Les alliages renfermant de 0 à 8 0/0 d'aluminium ou plus de 25 0/0 de ce métal ne présentent aucun point de transformation.

Les alliages qui contiennent entre 8 et 15 0/0 d'aluminium présentent tous au moins un point de transformation.

Deux faits sont à retenir :

1° La transformation à l'échauffement paraît se faire en plusieurs stades ;

2° La transformation au refroidissement est plus nette ; mais elle a généralement lieu à une température un peu plus élevée qu'à l'échauffement.

Ceci paraît contraire à tous les faits connus. Nous en donnerons plus loin une explication.

Voici les résultats obtenus :

COMPOSITIONS		POINTS DE TRANSFORMATION	
Cu 91,8	Al	A L'ÉCHAUFFEMENT	AU REFROIDISSEMENT
90	10	490	525
89,5	10,5	1er point très accentué 400-475 2e point peu net 750	500 750
88	12	1er point très accentué 390-450 2e point peu — 750	500-425
86	14	1er point très — 390-450 2e point peu — 750	450

Portons ces points à l'échauffement dans la figure 179, et nous établirons ainsi le diagramme complet des alliages aluminium-cuivre.

Influence des chauffages successifs. — Nous avons noté que, pour certains alliages, le point de transformation au refroidissement était supérieur au point de transformation à l'échauffement. Ceci semble, *a priori*, tout à fait contraire à la logique. On peut, toutefois, expliquer ce phénomène par ce fait que le métal préalablement constitué d'une solution α et du constituant β se transforme en une solution γ, quand il passe par le point de transformation et qu'au refroidissement cette solution γ ne donne pas les constituants $\alpha + \beta$, mais bien une solution α' différente de α et la solution β.

On peut encore penser que le phénomène est plus lent au refroidissement et que sa fin n'est pas nette.

Nous avons examiné si les chauffages réitérés n'ont pas d'influence sur la position du point de transformation.

Voici quelques-uns des résultats obtenus :

CHAUFFAGE	POINTS DE TRANSFORMATION	
	ECHAUFFEMENT	REFROIDISSEMENT
Premier	1° 410-475 2° 750	500 750
Deuxième	450-500	550 à 500
Le deuxième point se traduit ici par une suite de perturbations qui semble indiquer une succession de transformations.		
Premier	450-600	550
Deuxième	450-600 700-800	800 à 550

On voit donc que la position des points n'est pas sensiblement modifiée, mais que la transformation semble s'étendre sur une certaine échelle de température. C'est bien ce que va établir d'une façon irréfutable la micrographie.

Métallographie (Album, Pl. LXIV à LXX). — L'étude micrographique des alliages aluminium-cuivre a été faite par M. H. Le Chatelier, en superposant à l'état fondu du cuivre et de l'aluminium par ordre de densité et en les protégeant de l'oxydation par une couche de sels fondus.

M. H. Le Chatelier a défini ainsi quatre combinaisons, des cristaux très nets de la combinaison Al^2Cu, de grands cristallites jaunes qui seraient Cu^3Al et deux autres combinaisons intermédiaires dont les formules n'ont pu être établies.

Nous avons repris, avec un très grand nombre d'expériences, l'étude micrographique de ces alliages et les résultats que nous avons obtenus précisent un grand nombre de points et paraissent bien démontrer que le composé Cu^3Al n'est pas formé par ces grands cristaux jaunâtres signalés par M. H. Le Chatelier.

L'étude micrographique nous montre l'existence de sept

constituants que nous désignerons par les lettres α, β, γ, δ, ε, η, H.

1° *Constituant* α (Pl. LXIV, Phot. 253 et 254). — Le constituant α est une solution cuivre-aluminium renfermant de 0 à 8 0/0 d'aluminium.

Elle apparaît en jaune or par le perchlorure de fer en solution chlorhydrique (réactif d'Heycock et Neville) et par le chlorure de cuivre ammoniacal.

Tous les alliages correspondant à la droite AB sont formés de cette solution α.

L'attaque ne fait apparaître que des polyèdres plus ou moins importants et qui se voient toujours à l'œil nu.

Lorsque, prenant un de ces alliages, on le trempe à des températures inférieures au solidus, on n'obtient aucun changement apparent dans la structure. Parfois cependant on voit se former des clivages qui rayonnent à partir du bord (Pl. LXIV, Phot. 254). Ceux-ci sont probablement dus à la contraction occasionnée par le brusque refroidissement. Généralement les polyèdres — du moins ceux situés sur les bords — diminuent d'importance. Un recuit un peu prolongé peut également amener ces plans de clivage.

Constituant β (Pl. LXIV, Phot. 255 et 256; Pl. LXV, Phot. 257 à 260). — Lorsque la teneur en aluminium dépasse 8 0/0, on voit, sur les alliages refroidis lentement, apparaître des masses colorées en noir dans l'attaque au perchlorure ou au chlorure de cuivre; cette masse noire entoure de grands cristallites que l'on a toujours pris pour le composé Cu^3Al. Or ces cristallites ont absolument les mêmes caractères que la solution α. De plus, ils vont en diminuant quand le pourcentage d'aluminium augmente, tandis que l'autre constituant, que nous appellerons β, prend de l'importance.

Nous donnons trois photographies qui montrent ce fait extrêmement net (Phot. 255, 256 et 257).

L'alliage à 91,8 0/0 de Cu ne contient que des traces du constituant β; l'alliage à 90,2 en contient une quantité très importante; enfin, dans l'alliage à 89,5, le constituant β occupe plus du tiers de la surface.

Pour cette comparaison, les trois alliages précités ont été refroidis dans les mêmes conditions. On verra tout à l'heure l'importance de ce point.

Si l'on examine à fort grossissement le constituant β (Pl. LXV, Phot. 258), on le trouve formé de toutes petites aiguilles qui justifient la méprise qu'ont éprouvée certains expérimentateurs en le prenant pour un eutectique.

Si l'on considère l'alliage à 88,1 0/0 de cuivre, l'attaque au perchlorure fait apparaître de vastes polyèdres que l'on voit à l'œil nu et qui sont remplis de petites aiguilles du constituant β (Pl. LXV, Phot. 259).

Ce constituant β correspond donc bien au premier maximum de la courbe de fusibilité. Il ne saurait être que ou un composé défini (Cu^3Al), ou une solution solide.

Nous avons dit plus haut que les cristallites qui étaient entourés du constituant β devaient être la solution α.

Une preuve de plus à l'appui de cette hypothèse est la suivante :

Si l'on prend l'alliage à 91,8 0/0 de cuivre, qui contient un peu du constituant β et beaucoup du constituant α et qu'on le recuise à 800°, on voit apparaître, comme le représente nettement le photogramme 260 des polyèdres, comme dans les alliages formés de la solution α, et le constituant β forme simplement des lignes noires au milieu de la préparation (Pl. LXV, Phot. 260).

En un mot, les alliages renfermant entre 8,6 et 11,8 d'aluminium sont formés, après refroidissement lent, par les constituants α et β, ce dernier étant d'autant plus abondant que la teneur en aluminium est plus élevée.

Constituant γ. — Ce constituant n'existe jamais dans les alliages refroidis lentement.

Il est caractéristique de tous les alliages renfermant entre 8,6 et 11,8 0/0 d'aluminium et qui ont été refroidis brusquement à une température supérieure à leur point de transformation.

Il nous semble utile d'en étudier un exemple en détail.

Prenons l'alliage à 90,2 0/0 de cuivre, dont nous avons donné

la microstructure après refroidissement lent (Phot. 256).

Si nous le trempons juste au-dessus de son premier point de transformation (525° au refroidissement), nous voyons le constituant β se modifier; l'attaque au perchlorure de fer montre des aiguilles blanches très fines; on obtient le même résultat avec l'oxyde de cuivre ammoniacal (Pl. LXVI, Phot. 261 et 262).

Le même résultat est obtenu, quelle que soit la température de trempe entre 525 et 750°. A partir de cette température (qui correspond au second point de transformation à peine visible sur les courbes de refroidissement), une seconde modification s'opère : le constituant α tend à disparaître. Plus la température de trempe se rapproche du solidus, moins il reste du constituant α; le facteur *temps de chauffe* à température constante agit de même. Nous donnons quatre photogrammes qui reproduisent le phénomène.

La photographie 261 donne la microstructure de l'alliage à 91 0/0 de cuivre trempé à 600; la modification n'a touché absolument que le constituant β.

La photographie 263 reproduit la structure du même alliage trempé à 750°; ici le constituant α a partiellement disparu.

Ceci est plus accentué encore dans les trempes à 900° à 950° : le constituant α a presque entièrement disparu; il n'existe plus à 950° (Phot. 264 et 265).

Les alliages à constitution analogue nous ont donné dans la trempe des résultats semblables. Il en est un dont l'étude est particulièrement intéressante : c'est celui qui correspond au maximum de la courbe de fusibilité. On sait que cet alliage, refroidi lentement, montre d'importants polyèdres remplis de petites aiguilles se colorant facilement par le perchlorure de fer (constituant β, Phot. 259).

On n'apporte aucune modification tant que la température de trempe est inférieure au point de transformation (500° au refroidissement). A une température un peu supérieure, les lignes qui séparent les polyèdres s'éclaircissent et, dans l'intérieur, on voit de petites aiguilles blanches (Phot. 266). A 750°, on voit très nettement les grandes aiguilles blanches

(Phot. 267), qui sont d'autant plus nettes que la température est plus élevée, comme le montre la photographie 268 reproduisant la microstructure de l'alliage trempé à 900°.

Nous n'avons pas noté que les aiguilles s'arrêtassent toujours nettement aux bords des polyèdres ni qu'elles fussent parallèles dans un même polyèdre. Elles sont généralement parallèles dans une zone déterminée, sans que celle-ci coïncide avec le polyèdre. Nous croyons que les deux points signalés par M. Breuil, d'une part la formation d'aiguilles, d'autre part l'existence de plans de clivage, sont absolument différents.

Ces phénomènes ne sauraient non plus être rapprochés, comme l'a fait M. Breuil, de l'accentuation des plans de clivage que nous avons signalée dans certains aciers au nickel ou au manganèse. Nous n'avons pas admis que ces déformations cristallines fussent de l'austenite, comme le dit M. Breuil, mais bien au contraire la transformation ou, plutôt, un temps de la transformation de l'austenite en martensite. Nous pensons qu'ici on est seulement en présence d'une solution solide (constituant γ) qui existe à haute température et qui est maintenue par un refroidissement brusque, phénomène absolument analogue à la production de la martensite.

Constituant δ (Pl. LXVIII, Phot. 269, 270 et 271). — Quand la teneur en aluminium varie de 11,8 à 15,5, la microstructure montre le constituant β englobé dans une solution solide dont la couleur, dans l'attaque au perchlorure de fer, varie depuis l'or rougeâtre jusqu'à l'or pâle. C'est une solution solide que nous désignerons par la lettre δ et que nous allons rencontrer dans les alliages plus riches en aluminium.

En effet, lorsque la teneur en ce métal dépasse 15,5, on se trouve en présence de produits homogènes, dans lesquels toute attaque, acides étendus ou forts, alcalis, perchlorure, etc., ne peut faire apparaître que des polyèdres avec des plans de clivage plus ou moins accentués. Il en est ainsi jusqu'à 30 0/0 d'aluminium.

Le photogramme 271 représente l'alliage à 22 0/0 d'aluminium attaqué à l'acide azotique concentré.

Constituant ε (Pl. LXVIII, Phot. 272, et Pl. LXIX, Phot. 273 à 275). — Lorsque la teneur en aluminium dépasse 30 0/0, on se trouve en présence d'alliages qui, attaqués par la potasse, laissent voir de grands cristallites aux bords arrondis, le fond devenant noir.

Le polissage en bas-relief les fait apparaître en bleuté; ils semblent posséder une grande dureté.

L'importance de ces cristallites diminue au fur et à mesure que la teneur en aluminium augmente, comme le montrent les photogrammes reproduisant les microstructures des alliages à 32 et à 37 0/0 d'aluminium.

Lorsque la teneur d'aluminium atteint 40 0/0, l'aspect change bien que gardant ses principaux caractères.

Les cristallites changent de forme : on voit apparaître de grandes aiguilles qui ont absolument les mêmes caractères qu'elles.

La teneur en aluminium croissant, ces aiguilles apparaissent bientôt seules et leur importance diminue.

Nous croyons n'être ici qu'en présence d'un seul et même constituant que nous désignerons par ε.

Le constituant ε doit être le composé AlCu.

Le constituant est stable à toute température inférieure au solidus.

Quant au constituant qui forme le fond de ces alliages et qui s'attaque par la potasse, nous allons le définir maintenant.

Constituant η (Pl. LIX, Phot. 276, et Pl. LX, Phot. 277 à 279). — Quand la teneur en aluminium varie de 44 à 46, il semble que l'on se trouve en présence d'une solution solide de composition très voisine du composé Al^2Cu. Nous l'appelons η_1.

Lorsque la teneur en aluminium dépasse 47, on voit les grands cristaux très nets, déjà définis par M. Le Chatelier ; ils sont entourés d'un eutectique.

Ces cristaux diminuent, tandis que l'eutectique augmente, lorsque la teneur en aluminium croît.

Il en est ainsi jusqu'à 66 0/0 d'aluminium. L'acide chlorhydrique étendu fait très bien apparaître la constitution de cet alliage.

Le constituant η paraît bien être la combinaison Al^2Cu.

Il est stable à toute température inférieure au solidus.

Constituant H. — Pour une teneur en aluminium supérieure à 66 0/0, on trouve toujours de l'eutectique ; mais le constituant qu'entoure cet eutectique est autre ; nous l'appellerons H. Il s'attaque beaucoup plus rapidement que η par la potasse et les acides.

De plus, la cristallisation n'est plus nette.

Ce doit être de l'aluminium ou une solution aluminium-cuivre à très basse teneur en Cu. Comme η, H est stable à toute température inférieure au solidus.

En résumé, l'étude micrographique des alliages de cuivre et d'aluminium conduit à définir sept constituants, à savoir :

Le constituant α, solution contenant de 3 à 8 0/0 d'aluminium :

C'est ce constituant qui a été confondu jusqu'ici avec le composé Cu^3Al ;

Le constituant β, qui serait ou le composé Cu^3Al ou une solution solide ;

Le constituant γ, solution solide qui ne prend naissance que par trempe et qui renferme de 8,6 à 15,5 0/0 d'aluminium ;

Le constituant δ, solution solide dont la teneur en aluminium varie de 15,5 à 30 0/0 ;

Le constituant ϵ, qui paraît être le composé AlCu ;

Le constituant η, qui est le composé Al^2Cu ;

Il existe probablement une solution η_1 renfermant de 44,5 à 46 Al 0/0 ;

Le constituant H, qui est soit l'aluminium pur, soit une solution aluminium-cuivre à très faible teneur en aluminium.

Influence des traitements. — *Trempe.* — Nous avons dit, à propos du constituant γ, l'influence de la trempe à différentes températures sur la constitution des alliages qui renferment de 8,6 à 11,8 d'aluminium.

Nous avons montré que la transformation est plus ou moins incomplète suivant la température et le temps de chauffe.

En trempant des échantillons pendant le refroidissement

qui suit immédiatement la fusion, les résultats ont été identiques à ceux trouvés pendant l'échauffement.

Recuit et revenu. — Le recuit n'a pas d'influence sur la structure des alliages renfermant plus de 11,8 d'aluminium.

Sur les autres alliages, l'influence du recuit est très nette.

Pour les produits renfermant moins de 8,6 0/0 d'aluminium, le recuit agrandit les polyèdres et détermine la formation ou l'accentuation des plans de clivage.

Pour ceux renfermant de 11,8 à 8,6 0/0 d'aluminium, la température dépassant le point de transformation, la solution α forme des polyèdres, comme le montre la micrographie 260. On notera que le composé β forme des bandes noires (attaque au perchlorure de fer).

Si l'on prend de ces alliages trempés dans des conditions telles que la transformation déjà indiquée ait lieu et si on les soumet au recuit, on fait disparaître le nouveau constituant et on régénère la première microstructure.

La loi qui préside à cette transformation est d'ailleurs semblable à celle qui préside au revenu des aciers trempés (Photogr. 280).

Dilatation. — M. H. Le Chatelier a déterminé les dilatations des alliages cuivre-aluminium.

Voici les résultats obtenus :

CUIVRE POUR 100 DE L'ALLIAGE	DILATATION à 63° $\times 10^6$
100	16,4
91	16,3
75	16,5
60	15,7
50	15,8
33	16,2
30	20
10	21,9
0	24,6

Si l'on trace la courbe (*fig.* 179 *bis*) donnant ces résultats, on voit, que les combinaisons $AlCu^3$ et Al^2Cu semblent bien indiquées par des variations brusques.

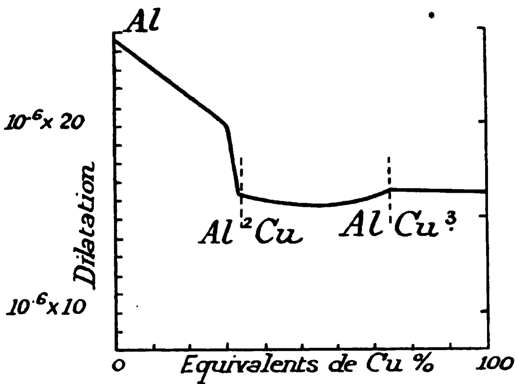


Fig. 179 *bis*. — Courbes des dilatations des alliages Cu-Al (H. Le Chatelier).

Étude chimique. — Nous avons étudié les alliages aluminium-cuivre en réduisant de l'oxyde de cuivre pur, CuO, par de l'aluminium en grains, suivant la méthode du Dr Goldschmidt. L'oxyde de cuivre a été préparé en traitant du cuivre électrolytique par l'acide azotique pur et en calcinant le nitrate ainsi obtenu. L'oxyde est broyé aussi finement que possible et mélangé en proportions déterminées, suivant l'expérience que l'on désire faire, à de l'aluminium en grains fins (mais non en poudre, la réaction étant trop vive dans ce cas). Dans la réduction de l'oxyde de cuivre par l'aluminium, il se produit très souvent des explosions violentes ; aussi ne faut-il opérer que sur de faibles quantités de matières (500 grammes environ) et prendre toutes les précautions nécessaires.

Cependant dans les expériences où l'aluminium domine, on peut utiliser sans danger 3 à 4 kilogrammes de mélange.

La réaction est représentée par l'équation :

$$3nCuO + (2n + 3m)\,Al = 3Cu^{n}Al^{m} + nAl^2O^3.$$

Pour préparer les différents alliages, on calcule les propor-

tions d'oxyde de cuivre et d'aluminium d'après la formule ci-dessus, où l'on fait successivement :

$$n = 1 \quad \text{et} \quad m = 0,1,2,3,4.....$$

et

$$m = 1 \quad \text{et} \quad n = 0,2.3,4.....$$

Mais dans ces recherches on est limité par la non-inflammabilité du mélange. Il est de toute évidence que plus on ajoute de l'aluminium en excès, plus on diminue la vitesse d'inflammation du mélange; pour une certaine quantité d'aluminium, il n'y a plus du tout inflammation.

Dans le cas qui nous occupe, cette limite est atteinte pour l'alliage $CuAl^4$.

Voici les résultats obtenus :

1° Quand on utilise un mélange formé de 0,380 d'oxyde de cuivre et de 0,120 d'aluminium, on obtient un alliage qui, traité par l'acide chlorhydrique étendu, lequel dissout l'aluminium en excès, laisse une poudre cristalline ayant pour formule $AlCu^3$.

2° Si l'on emploie $0^{kg},355$ d'oxyde de cuivre et $0^{kg},145$ d'aluminium, on obtient un alliage qui laisse, après traitement dans l'acide chlorhydrique étendu, le composé CuAl.

En traitant ce composé par l'acide azotique concentré, on obtient en quantités très minimes (2 à 3 0/0 du produit traité) une poudre noire insoluble dans cet acide et dans l'eau régale. — Ce résidu cristallisé est un siliciure double d'aluminium et de cuivre. La partie soluble dans l'acide azotique correspond bien au composé CuAl.

De plus, nous avons pu isoler cette combinaison à l'état de petits cristaux extrêmement fins que l'on rencontre parfois dans ces expériences.

3° La combinaison Al^2Cu est celle que nous avons pu isoler avec le plus de facilité. On l'obtient en cristaux superbes affectant la forme d'aiguilles prismatiques dont la longueur atteint parfois 2 à 3 centimètres.

Ces cristaux se trouvent dans de grandes alvéoles. — Ils

peuvent être aisément séparés de la masse. Mais ils sont toujours recouverts d'aluminium.

Le mélange qui permet de les obtenir le plus facilement est celui formé de $0^{kg},260$ d'oxyde de cuivre et $0^{kg},240$ d'aluminium.

Ces trois combinaisons $AlCu^3$, AlCu et Al^2Cu possèdent quelques propriétés extrêmement intéressantes. $AlCu^3$ se présente sous forme de poudre or nettement cristallisée; AlCu sous forme de poudre grise ; Al^2Cu en prismes d'apparence quadratique très allongés suivant l'axe principal.

Leurs densités sont données dans le tableau suivant :

FORMULES	DENSITÉ DÉTERMINÉE À 20°	DENSITÉ CALCULÉE
Cu^3Al	7,52	6,69
CuAl impur	5,76	5,02
$CuAl^2$	4,04	5,37

On voit que les composés Cu^3Al et CuAl se forment avec forte contraction, tandis que $CuAl^2$ éprouvent une augmentation de volume considérable.

L'acide chlorhydrique étendu n'attaque pas Cu^3Al; il a une très légère action sur CuAl et dissout rapidement $CuAl^2$. L'acide azotique à froid dissout immédiatement Cu^3Al et CuAl et n'a d'action sur $CuAl^2$ qu'à l'ébullition.

En résumé, l'étude chimique des alliages cuivre-aluminium, par la méthode aluminothermique, nous a permis d'isoler trois combinaisons Cu^3Al, CuAl, $CuAl^2$; nous n'avons pu rencontrer le quatrième composé voisin de CuAl et trouvé par M. H. Le Chatelier.

Chaleur de formation. — Des déterminations ont été faites à ce point de vue par MM. Louguinine et Schukareff par la méthode de dissolution dans une solution de brome dans le bromure de potassium.

Ils ont trouvé :

Cu^3Al	123,5	$CuAl$	20,8
Cu^2Al	137,9	Cu^2Al^3	48,9
Cu^3Al^2	71,0	$CuAl^2$	— 57,2

II. — ÉTUDE INDUSTRIELLE

Fabrication. — Il faut distinguer au point de vue industriel deux sortes d'alliages de cuivre et d'aluminium :

Les alliages très riches en cuivre qui renferment de 0 à 10 0/0 d'aluminium et les alliages très riches en aluminium renfermant de 2 à 6 0/0 de cuivre.

Les premiers sont connus sous le nom de bronzes d'aluminium, les seconds sont souvent vendus sous le nom d'aluminium et sont utilisés surtout dans la construction des automobiles pour toutes les pièces formant enveloppes (carters de changement de vitesse, carters des volants de moteur, etc.).

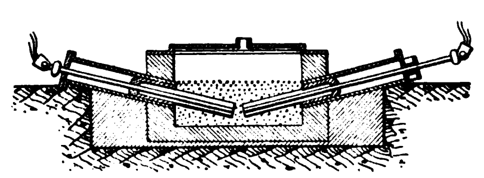


Fig. 180. — Four Cowles.

Pour obtenir les uns ou les autres de ces alliages, on fond le métal qui se trouve en excès et on fait l'addition voulue de l'autre métal.

Comme dans la préparation de tous les alliages d'aluminium, il faut avant tout se garantir contre l'oxydation.

Il faut noter, pour la préparation des pièces moulées, que le bronze d'aluminium se contracte beaucoup plus que les autres métaux.

Pour éviter l'introduction des crasses dans le moule ou la lingotière, on coule généralement dans une poche intermédiaire dont le fond comporte un bouchon que l'on enlève au moment où toutes les pellicules d'oxyde sont remontées à la surface. Il serait peut-être plus simple d'utiliser une poche

saucière dans le genre de celle que nous avons déjà signalée.

Les bronzes d'aluminium peuvent aussi être préparés au four électrique, ou, du moins, on peut obtenir par ce moyen un alliage utilisé comme matière première dans la fabrication du bronze d'aluminium.

Cette méthode a été décrite dans le mémoire présenté par W. Robert à la Société des Ingénieurs du Cleveland, en décembre 1888. Nous en reproduisons les parties les plus intéressantes.

Les alliages d'aluminium sont préparés, par la Cowles Electrical Smelting Company, dans un four électrique représenté en section verticale (*fig.* 180)[1] : « Il consiste en une cavité oblongue de $1^m,25$ de longueur, $1^m,60$ de profondeur et $0^m,51$ de largeur. Il est construit au-dessous du niveau du sol et garni de briques réfractaires. Aux deux extrémités sont des tubes en fonte inclinés pour favoriser le maniement des électrodes; aux extrémités de ces tubes sont des couvercles munis de garnitures à travers lesquels passent les électrodes. Sur les couvercles sont vissés des blocs en bois environnant les garnitures. Chacune des électrodes porte un écrou à travers lequel passe une vis ayant à son extrémité extérieure une poignée en T, pendant que son extrémité inférieure reste contre le bloc de bois. La rotation de ce système donne à l'électrode un mouvement d'entrée ou de sortie. Le haut de la construction en briques est recouvert avec des plaques de fer, et un couvercle de fer placé au-dessus de l'ouverture du four, comme le montre la figure 180; dans ce couvercle est un trou pour permettre l'échappement des gaz. Les électrodes consistent en baguettes de charbon de 57 millimètres de diamètre qui sont attachées ensemble et réunies à une électrode commune. Pour cela, on coule du métal autour des extrémités des charbons et de l'électrode commune, de façon à former un conducteur en contact parfait avec toutes les parties jointes. Le métal employé est choisi eu égard à l'alliage particulier

1. *Mémoire lu par M. W. Robert à la Société des Ingénieurs du Cleveland*, décembre 1888.

devant être traité dans le four; quoique, dans le cas actuel, il ne soit pas soumis à une chaleur très intense, on a trouvé qu'il exerçait une légère influence sur le produit du four.

« Nous avons donc un four couvert muni à ses extrémités de deux électrodes capables d'être facilement déplacées. On se sert du four de la façon suivante : Les deux électrodes sont mises en communication avec la dynamo, le câble allant au pôle positif envoyant le courant dans l'électrode gauche, d'où il traverse la charge; rencontrant une résistance, il y produit de la chaleur, puis, par l'électrode droite, il arrive au câble allant au pôle négatif de la dynamo. La résistance est due aux particules de charbon qui sont dans la masse. Ainsi le courant agit indépendamment de la structure du four lui-même, agissant simplement sur la charge immédiatement en contact avec le carbone, ce qui donne lieu à la production de chaleur. La chaleur développée est énorme ; quoique le charbon de bois soit réputé comme étant un corps non conducteur le plus convenable pour faire une doublure protectrice, l'intensité de la chaleur le convertit en peu de temps en graphite ; il perd ainsi ses propriétés non conductrices. Le renouvellement fréquent du charbon de bois devient coûteux; on surmonte la difficulté en plongeant le charbon de bois partiellement transformé en graphite dans de l'eau de chaux ; la chaux rend encore le charbon de bois suffisamment non conducteur.

« Lorsque l'on charge le four à froid, on met du charbon de bois dans le fond et on le comprime fortement de façon à former une première couche d'épaisseur suffisante. Les électrodes sont amenées presque au contact dans le four, et la charge est alors placée au centre du four de façon à environner les extrémités des électrodes. La charge pour l'alliage de cuivre consiste en 136 kilogrammes de matière ; un quart est constitué par du minerai d'aluminium concassé, une grande partie de ce minerai passant dans le laitier formé tout d'abord sous l'action de la chaleur ; il y a environ 4 0/0 de carbone, et le reste est du cuivre granulé.

« Le minerai employé est quelquefois le corindon, appelé

aussi saphir et rubis. Les cristaux ternes sont désignés sous le nom de corindon, et les variétés grises et noires sous le nom d'émeri. C'est essentiellement de l'alumine Al^2O^3. Actuellement le minerai employé en Angleterre est la bauxite; sa composition moyenne est la suivante :

Silice	2,8
Alumine	57,4
Oxyde ferrique	25,5
Chaux	0,2
Oxyde titanique	3,1
Eau et matières volatiles	11,0

« Quoique d'un prix moindre que le corindon, cette matière convient très bien. Pour que des portions de la matière ne soient pas trop distantes des électrodes, on empêche la charge de s'étendre latéralement par deux plaques de tôle maintenues à une certaine distance et placées de chaque côté des électrodes. Le mélange est placé entre elles, et on achève de remplir avec du charbon de bois ; puis, on retire les tôles, le haut de la charge est couvert et les parties vides du four sont garnies de charbon de bois; on en met suffisamment pour dépasser de quelques centimètres la charge et les électrodes. Le couvercle de fer est alors luté avec de la terre réfractaire. On donne d'abord un courant de 2.000 à 3.000 ampères, et la résistance diminue au fur et à mesure que la masse fond. Les électrodes sont alors éloignées l'une de l'autre, la vitesse de la machine est augmentée, et un courant de 500 ampères traverse la masse jusqu'à ce que tout soit fondu. Une opération dure une heure trois quarts. Il est établi que le cuivre et l'aluminium s'unissent tous deux à l'état gazeux, et la Compagnie estime que de cette manière on a une union intime entre les constituants de l'alliage ; l'homogénéité et la résistance de l'alliage obtenu sont supérieures à celles d'un alliage fait par toute autre méthode. »

Voici, enfin, la méthode de M. Héroult qui repose, d'après les termes des brevets pris en France, le 15 avril 1887, sur l'action thermique et électrolysante d'un courant électrique

sur l'oxyde d'aluminium et le métal avec lequel l'aluminium doit être allié.

Une caisse, en fer ou en un autre métal, isolée du sol et ouverte supérieurement, est munie d'un épais revêtement de plaques de charbon qui sont reliées entre elles au moyen d'un mastic de charbon.

Ce dernier peut être, par exemple, du goudron, du sirop de sucre ou du glucose. La caisse, dans laquelle est enfermé le bassin, doit aussi être bonne conductrice. Si l'on veut arriver à une très bonne conductibilité par contact très intime des parois extérieures en charbon du bassin avec la paroi interne de la caisse, on coule celle-ci autour du creuset en charbon, et par le refroidissement on obtient le contact le plus intime avec le charbon.

Dans la caisse se trouve un certain nombre de chevilles en cuivre, qui amènent le courant électrique négatif à l'intérieur du bassin avec une très faible résistance. Dans ce bassin plonge l'électrode positive, dont les différentes baguettes de charbon sont appliquées l'une contre l'autre, ou laissent entre elles des intervalles qui doivent être remplies d'une matière conductrice (cuivre ou charbon).

A l'extrémité supérieure, les baguettes de charbon sont maintenues par un cadre, dont l'anneau sert pour suspendre tout le système à une chaîne, à l'aide de laquelle le faisceau de charbon est mis au point (c'est-à-dire placé dans sa position) et peut être élevé ou abaissé. Le cadre entourant la périphérie du faisceau est pourvu des pièces de serrage nécessaires, telles que vis, etc., pour la fixation du câble positif.

A l'exception de l'espace nécessaire pour le mouvement vertical du faisceau de charbon, l'ouverture du bassin est recouverte par des plaques de graphite, dans lesquelles se trouvent quelques orifices pour l'introduction des matières. Au-dessous des orifices sont aussi ménagés, si c'est nécessaire, des évidements. Ces canaux servent aussi pour la sortie des gaz dégagés dans le bassin.

Les plaques mobiles, munies d'un cadre avec poignée, servent pour couvrir les orifices pendant les différentes phases de la fusion. L'espace compris entre les plaques de graphite et le bord de la caisse est rempli de poudre de charbon de bois.

Au début de l'opération, on introduit dans le bassin du cuivre, qu'il est convenable d'employer en fragments ; le faisceau de charbon étant ensuite amené au contact du cuivre, le courant passe par ce dernier et le fond. Dès que le bain de cuivre liquide servant de pôle négatif est obtenu, on introduit aussi de l'alumine dans le bassin, et l'on remonte un peu le faisceau. Le courant passe maintenant à travers l'alumine qui fond et se décompose. L'oxygène se rend au charbon et le brûle, de sorte que de l'oxyde de carbone se dégage du bassin. L'aluminium se sépare de sa combinaison oxygénée et se réunit au cuivre ; du bronze d'aluminium est ainsi formé directement.

On continue maintenant à alimenter le bassin à mesure que progresse la séparation électrolytique de l'aluminium, en ajoutant continuellement ou de temps en temps du cuivre et de l'alumine.

Le faisceau de charbon doit, comme on l'a dit précédemment, être relevé ou abaissé selon la résistance. Ce réglage peut, du reste, avoir lieu automatiquement, la chaîne à laquelle est suspendu le faisceau étant, par exemple, mise en communication avec un moteur électro-dynamique réversible (réglé par un ampèremètre), qui agit comme régulateur électrique. Pour évacuer le bronze d'aluminium liquide rassemblé au fond du bassin, on amène au-dessous du trou de coulée la lingotière garnie intérieurement de charbon, et on retire la baguette de charbon qui ferme le trou de coulée pour ne la remettre en place que lorsque la lingotière est pleine. On continue ensuite l'opération en abaissant encore le faisceau de charbon et ajoutant dans le bassin de nouvelles charges d'alumine et de cuivre.

Les principaux types d'alliages cuivre-aluminium utilisés dans l'industrie sont :

1° Comme alliages riches en cuivre :

Cu	95 à 96
Al	5 à 4
Cu	92 à 93
Al	8 à 7

Au-dessous de 4 0/0 d'aluminium, on a un métal qui s'altère presque aussi rapidement que le cuivre; au-dessus de 8 0/0 d'aluminium, on rencontre déjà des difficultés pour l'obtenir sain.

Ces alliages peuvent aisément se laminer, s'étirer, etc.; — ils se prêtent donc bien à la fabrication des barres, profilés, planches, etc.

Pour les pièces fondues on atteint quelquefois :

Cu	90
Al	10

mais la préparation d'un tel alliage est toujours délicate; il y a toujours à craindre des soufflures.

2° Les alliages cuivre-aluminium riches en aluminium sont généralement du type suivant :

Cu	3 à 6
Al	97 à 94

Quelquefois cependant on rencontre le type

Cu	2
Al	98

Voici, d'ailleurs, l'analyse de quelques-uns des échantillons que nous avons examinés et qui sont utilisés dans l'industrie de l'automobile :

Al	Cu	Si	Fe
95,7	4,1	0,32	0,07
94,9	4,7	0,41	0,10
96,2	3,5	0,32	0,09
95,4	4,0	0,33	0,12
96,8	3,9	0,24	0,07
97,0	2,7	0,19	0,20
96,9	2,8	0,20	0,12
96,5	3,1	0,31	0,05

Propriétés. — Les propriétés des alliages cuivre-aluminium furent étudiées pour la première fois par Debray, qui fit de nombreux essais sur l'alliage à 10 0/0 de cuivre.

Cet alliage possède une couleur or légèrement vert. Il offre une grande dureté ; il est malléable à froid, mais beaucoup plus à chaud.

Quant au dégagement de chaleur qui se produit au moment où l'on ajoute l'aluminium dans le bain de cuivre fondu, fait sur lequel on s'est basé parfois pour affirmer l'existence d'une combinaison cuivre-aluminium, il peut et doit même être attribué, du moins en partie, à la réduction de l'oxydule de cuivre dissous dans le bain et qui est réduit par l'aluminium avec grand dégagement de chaleur.

Les alliages cuivre-aluminium conservent la couleur or jusqu'à la teneur de 14 0/0 d'aluminium. Pour des teneurs supérieures en ce métal, ils sont blanc gris ou blanc d'argent. Le changement de couleur correspond nettement au moment où le constituant β disparaît.

Jusqu'à 10 0/0 d'aluminium, ces alliages sont malléables et très peu fragiles. Mais à 11 0/0 ils deviennent fragiles; ils sont d'ailleurs difficiles à obtenir sains, et cela d'autant plus que la teneur en aluminium augmente.

A 20 0/0 d'aluminium, on peut pulvériser l'alliage au mortier. Pour une teneur en aluminium de 14 0/0, l'alliage est toujours très fragile et, en même temps, très dur.

La malléabilité ne renaît que lorsque la teneur en alumi-

nium dépasse 66 0/0, au moment où apparaît le constituant H.

Voici, tout d'abord, les résultats obtenus, par la *Cowles Company*, sur les alliages riches en cuivre, plus connus sous le nom de bronzes d'aluminium.

TENEUR EN Al 0/0	R	A 0/0
1,25	14 à 19	20 à 35
2,5	19 à 24	60 à 45
5	24 à 33	35 à 50
5,5	33 à 39	30 à 35
7,5	39 à 44	30 à 25
10	44 à 71	25 à 4
11	71 à 79	0 à 5 0/0

Ces chiffres ne sont pas d'une grande netteté : on ne sait pas, en effet, dans quel état se trouvent les éprouvettes prélevées, et l'on ne comprend pas les différences énormes qui existent quelquefois pour une même composition, à moins que l'on n'ait considéré un même alliage sous différents états d'écrouissage. Ceci expliquerait la variation considérable (de 44 à 71) trouvée pour l'alliage à 10 0/0.

D'autres essais nombreux permettent d'attribuer à l'alliage

Cu........................	90 0/0
Al........................	10 0/0

laminé les propriétés suivantes :

R...........	50 à 60	kilogrammes
A 0/0........	25 à 10	—

Les variations notées semblent être dues à la plus ou moins grande vitesse de refroidissement.

M. Baclé, dans son *Rapport à la Commission des Méthodes d'essais*, s'exprime de la façon suivante sur les propriétés des bronzes d'aluminium [1] :

1. *Commission des Méthodes d'essais*, t. II, p. 215.

« Les bronzes légers à 2 0/0 de cuivre ont une résistance de 16 kilogrammes avec un allongement de 18 0/0. — Les bronzes d'aluminium tenant 3 à 5 0/0 de cuivre se travaillent facilement par forgeage et laminage et peuvent servir à la préparation des tôles et des cornières. La résistance du métal sortant du laminoir atteint 28 kilogrammes avec un allongement de 4 0/0 seulement ; mais après recuit on trouve les résultats que nous venons d'indiquer : résistance de 16 kilogrammes et allongement de 20 0/0.

« Le métal ainsi obtenu est assez mou et se travaille avec une grande facilité, comme le bon cuivre ; son défaut principal est de s'écrouir rapidement, lorsqu'il est travaillé à froid.

« Le plus intéressant est le bronze d'aluminium à 9 ou 10 0/0 d'aluminium, qui présente à l'état simplement fondu une résistance supérieure à celle de tout autre corps. »

En faisant varier la composition, on peut obtenir des résistances variant depuis 38 jusqu'à 60 kilogrammes avec le métal doux, jusqu'à 70 et 80 kilogrammes avec le métal dur. Les bronzes d'aluminium additionnés de nickel sont particulièrement ductiles et présentent des résistances allant de 50 à 75 kilogrammes, avec allongement de 30 0/0. La teneur en silicium influe, du reste, en même temps que celle en aluminium, sur les résultats obtenus. M. A. Le Chatelier a signalé que les alliages à teneurs de 8 0/0 d'aluminium et au dessus ne présentent guère à l'essai de traction que des allongements proportionnels, car la rupture se fait toujours sans striction.

Cet ingénieur observe, en outre, que les chiffres de résistance et d'allongement dépendent surtout de la finesse du grain, qui est d'ailleurs très remarquable dans ces métaux dont la cassure présente un aspect soyeux. Cette finesse se trouve augmentée du reste par la coulée en moule métallique qui entrave la cristallisation en précipitant le refroidissement. Les bronzes d'aluminium, surtout ceux exempts de silicium, supportent dans des conditions très remarquables des essais de choc, quelquefois même plus rigoureux que ceux de l'acier moulé. M. A. Le

Chatelier cite qu'il a pu plier à 90° un barreau de 30 × 30 déjà entaillé sur ses quatre faces.

M. Baclé ajoute :

« Les bronzes se forgent et se laminent avec facilité, à condition d'opérer surtout au rouge ; mais il faut éviter le rouge sombre en présence du silicium. Ils subissent la trempe qui agit, comme pour l'acier[1], en augmentant la charge de rupture et surtout la limite élastique et réduisant l'allongement, comme on le verra par les résultats suivants:

	E	R	A 0/0
Avant trempe.......	22^{kg},0	47,3	17
Après trempe.......	33 ,6	52,3	12. »

En raison de la grande finesse de leur grain, les bronzes d'aluminium doivent donner, ainsi que le remarque M. A. Le Chatelier, des frottements excessivement doux.

Voici les résultats d'une série d'expériences que nous avons faites sur les alliages cuivre-aluminium simplement coulés.

MÉTAL EMPLOYÉ	R	E	A 0/0	Σ
1° *Alliages très riches en aluminium*				
Al commercialement pur...	9,4	3	7	10,1
Al + 1 0/0 Cu	10,3	3,5	5	3,2
Al + 2 0/0 Cu	10,9	4,0	4,5	3,7
Al + 3 0/0 Cu	12,0	4,9	5	3,2
Al + 4 0/0 Cu	12,9	5,2	6	3,0
Al + 5 0/0 Cu	13,2	5,0	3	0
Al + 6 0/0 Cu	13,6	5,2	2	0
2° *Alliages riches en cuivre (bronzes d'aluminium)*				
Cu + 3 0/0 Al.............	20,9	7,9	36	
Cu + 5 0/0 Al	23,9	8,4	53	
Cu + 7 0/0 Al	25,4	9,1	66	
Cu + 10 0/0 Al	30,5	16,9	6	

1. Nous verrons plus loin que ceci est erroné.

Voici, d'autre part, les résultats que nous avons trouvés sur barres *laminées :*

MÉTAL EMPLOYÉ	R	E	A 0/0	Σ
Aluminium commercial pur recuit.....	9,6	6,2	29	70,6
— écroui............	11,2	5,1	11	65,5
Alliage à 2,5 0/0 Cu recuit............	19,8	6,3	11,5	41,5
Alliage à 3,6 0/0 Cu —	21,4	6,6	20	41,5
Alliage à 91,95 0/0 Cu recuit..........	46,2	42,9	43	40,4
Alliage à 92,23 0/0 Cu —	43,2	34,7	54	44,8

Voici, enfin, ce que garantissent les industriels qui préparent ces alliages *laminés :*

	R	A 0/0
Aluminium pur recuit...................	12	31
— écroui	16	4
Alliage à 3 0/0 Cu recuit...............	19	9,5
— écroui...............	22	4,5
Alliage à 6 0/0 Cu recuit...............	20	11
— écroui...............	25	4
Bronze d'aluminium à 7 0/0 Al recuit	40	45
— — très écroui	80	3

Influence de la trempe. — Les résultats que nous donnons ont été obtenus par trempe sur barres coulées ou laminées.

1° ESSAIS SUR BARRES COULÉES

TEMPÉRATURES DE TREMPE	I° Cu = 97,00; Al = 3,01				II° Cu = 94,88; Al = 5,04				III° Cu = 93,13; Al = 6,76			
	R	A 0/0	Choc	Dureté	R	A 0/0	Choc	Dureté	R	A 0/0	Choc	Dureté
Non trempé.	20,9	36	48	58	22,6	41	46	61	24,7	49	34	61
300.........	19,1	37	49	58	23,7	46	46	58	24,1	52	35	61
400.........	19,1	37,5	48	54	25	66	44	61	20,7	70	35	58
500.........	19,7	53,5	53	54	25	68	50	58	28,2	62	36	61
600.........	26,4	61,5	52	54	25	58,5?	52	54	27,2	63	34	61
700.........	19,3	43	48	54	25	64,0	53	54	27,8	66	35	61
800.........	18,4	44	47	54	25,6	79,0	56	50	26,1	63	36	61
900.........	16,2	38	40	50	22,4	54,0	48	50	25,4	54	32	61

2° ESSAIS SUR BARRES LAMINÉES ET RECUITES

TEMPÉRATURE DE TREMPE	I° Cu = 91,95 ; Al = 8,03				II° Cu = 92,23 ; Al = 8,45			
	R	A 0/0	Choc	Dureté	R	A 0/0	Choc	Dureté
Non trempé	46,2	43,5	30	95	43,2	54	32	61
300	51,15	42,5	32	91	42,2	54	42	61
400	44,8	34,5	34	88	41,6	68	50	61
500	47,8	38	36	83	42,2	63	44	58
600	47,8	43	36	75	44,8	49	36	58
700	49,5	45,5	34	61	42,2	62,5	34	58
800	46,2	46	36	61	46,7	61	33	58
900	44,2	55	33	63	40,2	64	34	58

Ces résultats montrent que sur ces alliages, qui sont formés de la solution α, une trempe faite à certaines températures agit, comme sur les alliages cuivre-étain, en augmentant la charge de rupture et les allongements.

Toutefois, on notera que la différence est beaucoup plus accentuée dans les alliages bruts de coulée que dans les alliages laminés.

[Dans les premiers, les allongements atteignent parfois 80 0/0 ; c'est là, il nous semble, le chiffre le plus élevé qui ait été obtenu, à part les aciers à fer γ, qui nous ont donné parfois 80 à 85 0/0 et une fois 90 0/0 (acier C = 0,120, Mn = 30 0/0)].

Ceci s'explique aisément : en effet, étant donné que la trempe n'apporte aucun changement visible dans la microstructure, son action doit être attribuée à l'homogénéité plus ou moins grande à haute température de la solution α. Or le laminage, comme tout travail mécanique, aura eu pour effet d'amener déjà une certaine homogénéité que ne possède pas le produit brut de coulée.

Utilisation. — Les principaux emplois des alliages cuivre-aluminium sont :

1° Pour les alliages riches en cuivre :

α) La confection d'objets divers de Paris (broches, porte-crayon, etc.), de couverts, vaisselle, pour imiter les alliages d'or ;

β) La préparation de coussinets d'excentriques, etc. : l'alliage à 10 0/0 a été particulièrement préconisé pour cet usage ; son emploi ne s'est cependant pas généralisé ;

γ) La confection des ressorts, notamment de ressorts plats prélevés dans des planches écrouies.

2° Pour les alliages riches en aluminium :

α) Les constructions automobiles pour les pièces servant d'enveloppes ;

β) La préparation de quelques pièces de construction extrêmement légère : appareils de filtration, appareils à eau de Seltz, récipient de lait et de vin, batterie de cuisine, etc...

γ) La fabrication de cornières et profilés : mais là il n'a pas donné tous les résultats que l'on espérait. Plusieurs expériences célèbres ont montré que ces alliages ne résistent pas à l'atmosphère marine.

Il suffit de rappeler les résultats obtenus par la Mission hydrographique du Niger, dirigée par M. le lieutenant de vaisseau Hourst.

Nous disons plus haut que l'alliage à 3 0/0 d'aluminium est employé pour la fabrication des batteries de cuisine. Voici, d'après M. Moissonnier, les avantages qu'il présente :

« 1° Métal ne fondant pas au feu libre ; ne produisant pas de vert-de-gris, comme le cuivre ; absolument inoffensif[1] par lui-même et ne contenant pas la moindre trace d'arsenic, comme cela peut arriver avec le nickel, ne s'oxydant pas et n'exigeant en aucune façon l'étamage ou l'émaillage si friable, à cause de la différence des coefficients de dilatation ; pouvant facilement présenter à l'intérieur le ton mat de l'argent et à l'extérieur le poli du nickel ; il est très facile à entretenir avec des pâtes à mordants très doux pour la partie brillante et avec le savon minéral (tripoli et carbonate de soude) pour la partie mate, en évitant seulement le contact avec l'acide chlorhydrique et autres composés chlorés, tels que l'eau régale, ou avec de l'eau contenant de la soude ou de la potasse en solution concentrée ;

1. A ce sujet, nous tenons à faire remarquer qu'il est bien reconnu, à l'heure actuelle, que la toxicité des sels de cuivre est nulle.

2° Pouvant être plaqué de cuivre pur à l'extérieur, comme cela se fait pour l'argent, mais avec un prix de revient bien moindre;

3° Présentant presque la même conductibilité pour la chaleur que l'argent avec un pouvoir émissif également très faible;

4° Ne pesant, à volume égal, que le tiers à peine du fer, du cuivre, du nickel ou de l'argent. »

BRONZES D'ALUMINIUM COMPLEXES

On a cherché à améliorer le bronze d'aluminium par addition de certains corps, tels que le silicium, le bore, etc.

Disons de suite que le plus intéressant, au point de vue des alliages à haute teneur en aluminium, est l'addition de cadmium, dont 2 à 3 0/0 améliore considérablement les propriétés mécaniques. MM. de Susini et Langlois ont pris, en 1895, un brevet pour des bronzes d'aluminium siliciés. Ces alliages sont obtenus de la façon suivante : dans un creuset en plombagine on met 20 parties d'aluminium et 80 parties de fluosilicate de potasse.

On chauffe pendant deux heures à la température de fusion de l'acier. D'autre part, on fait fondre du cuivre et on lui ajoute en quantité convenable le métal obtenu dans la première opération. Le type cité par les auteurs a la composition suivante :

Cu	90 0/0
Al	9 0/0
Si	1 0/0

Mais ils n'indiquent pas les propriétés de cet alliage.

En mars 1896, on entend préconiser l'emploi de bronzes d'aluminium renfermant du zinc, du bore et du silicium.

Le procédé de fabrication a été indiqué par MM. Quintinne, Devy et Franck, qui prétendent obtenir un métal très résistant.

On place dans un creuset $1^{gr},00$ de silice et $20^{kg},00$ d'acide borique; on chauffe au rouge clair et on ajoute de l'aluminium. Dans un autre creuset contenant de l'acide borique, on fait fondre $60^{gr},00$ de laiton à 30 0/0 de zinc et 70 0/0 de cuivre, en y ajoutant $940^{gr},00$ de l'aluminium préparé précédemment.

En 1897, M. Secrétan a fait breveter un bronze d'aluminium renfermant du magnésium, du nickel et du phosphore.

Voici la composition de cet alliage :

Cu..................	91 à 95 0/0
Al et Ni.............	9 à 5 0/0
Ph	0,5 0/0 au maximum.
Mg	1,5 0/0 au maximum.

Quelle que soit l'imagination qui a souvent présidé à ces différentes inventions, on peut affirmer que le bronze d'aluminium est amélioré par l'addition de certains corps, notamment de silicium. Nous n'en voulons pour témoin que les expériences qui ont été publiées par le regretté professeur Tetmajer et dont nous reproduisons les résultats les plus intéressants (*Comptes Rendus de la station d'essais des matériaux de l'École Polytechnique de Zurich*, livraison IX).

COMPOSITION DE L'ALLIAGE					PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES A LA TRACTION		
Cu	Al	Fe	Si	S	R	E	A 0/0
			Sur barres coulées				
99,74	»	»	»	»	21,6	9,1	26,7
93,35	4,62	0,89	0,98	0,04	37,4	9,7	46,6
91,17	5,92	0,78	2,12	0,04	49,6	15,7	28,1
90,43	7,50	0,54	1,54	0,05	48,6	14,2	31,3
89,67	7,08	0,72	2,72	0,12	53,1	22,2	7,4
86,07	10,05	0,98	2,48	0,14	62,9	?	0,15
			Sur barres laminées				
90,99	7,96	»	1,36	»	49,9	21,6	18,4
90,38	8,29	»	1,41	0,04	53,9	25,1	15,3
89,77	7,43	0,54	2,58	»	57,9	25,2	16,5
91,66	6,69	»	1,83	0,04	52,5	23,3	33,5
90,38	7,62	0,73	1,44	»	52,0	21,1	25,3
88,83	7,19	2,27	1,32	0,05	52,2	19,8	35,4
93,59	4,99	0,91	0,91	»	43,7	17,3	41,6
89,99	7,98	0,89	1,23	»	50,9	21,8	12,5
86,71	9,80	0,78	2,38	»	69,6	31,3	0,4
89,88	7,37	1,02	1,95	»	55,4	20,6	18,3
88,16	11,01	0,34	0,80	»	51,1	31,1	0,2
90,50	8,81	0,56	0,61	»	50,7	22,3	20,7

Il y a dans ces tableaux quelques contradictions provenant surtout des barres coulées, qui pouvaient être plus ou moins saines.

Néanmoins, on peut dégager de ces résultats que le silicium et le fer jouent le même rôle que l'aluminium en augmentant la charge de rupture et diminuant les allongements.

Ceux qui paraissent donner les résultats les plus intéressants pour l'industrie sont ceux pour lesquels la somme Al + Si = 8 à 10 0/0; avec plus de 10 0/0, on a des alliages trop fragiles ; avec moins de 8 0/0, on a une résistance trop faible.

Voici, enfin, les résultats obtenus sur quelques autres alliages laminés ou forgés et notamment le bronze d'aluminium renfermant un peu de nickel.

COMPOSITION					PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES			ÉTAT DE L'ALLIAGE
Cu	Al	Fe	Si	Ni	R	E	A 0/0	
91,00	8,95	»	0,07	»	62	47	27	Laminé dur
					55	20	42	Forgé
					49	18	48	Laminé
89,94	9,98	»	0,10	»	60	20	18,5	Forgé
89,81	9,99	0,04	0,12	»	61	21	19	Forgé
88,23	10,50	0,21	0,12	0,88	71	18	10	Forgé
89,30	8,89	1,33	»	0,12	59	28	31	Laminé
88,38	8,44	2,98	»	0,17	64,5	26,5	33	Forgé
87,93	5,96	4,09	1,37	0,20	63,3	42,6	21	Laminé

Il est fort regrettable que des essais n'aient pas eu lieu sur métal recuit, de façon à pouvoir établir exactement le rôle du nickel, qui paraît augmenter R et E. Enfin il est bon de mentionner le résultat obtenu par M. Hélouïs, en 1896, avec un alliage renfermant 91 0/0 de cuivre, 8 0/0 d'aluminium et 1 0/0 de vanadium.

Cet alliage aurait donné :

R	53
A 0/0	32

III. — CONCLUSIONS

En résumé, on voit que les seuls alliages de cuivre et d'aluminium utilisés industriellement sont ceux renfermant moins de 10 0/0 d'aluminium et ceux contenant plus de 94 0/0 de ce métal.

Les premiers sont formés soit de la solution α Cu-Al, soit de la solution α et du corps β que nous avons défini plus haut. Mais la présence de ce dernier apporte de la fragilité et de la dureté. Aussi ne peut-on pas dépasser 10 0/0 d'aluminium.

Lorsque l'alliage contient le composé AlCu, il est très fragile et nullement industriel.

Quant au composé Al^2Cu renfermé en trop grande quantité, il donne de la dureté et de la fragilité. Les alliages formés d'aluminium et contenant de faibles quantités de l'eutectique Al-Al^2Cu sont fort intéressants; à cett ecatégorie appartiennent ceux contenant moins de 6 0/0 de cuivre.

Donc, sont seuls industriels parmi les alliages aluminium-cuivre :

1° Ceux contenant la solution α, soit pure, soit avec un peu du corps β;

2° Ceux constitués par de l'aluminium englobé dans un peu d'eutectique Al-Al^2Cu; cet eutectique, qui forme *ciment*, est assez dur et facilite le travail du métal.

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE XI

1° ÉTUDE THÉORIQUE

Breuil, *Association des Méthodes d'essais* (*Groupe français*), décembre 1905 (*Trempe*); — *Comptes Rendus*, février 1902 (*Id.*).

Campbell, *Journal of Franklin Institute*, CLVIII, 161-184, 1904 (*Id.*).

Guillet, *Bulletin de la Société d'Encouragement*, août 1902 (*Étude chimique*); — *Comptes Rendus* (*Id.*); — *Revue de Métallurgie*, août 1905 (*Constitution*); —Thèse de doctorat, 1902 (*Étude chimique*).

Le Chatelier (H.), *Contribution à l'étude des Alliages métalliques*, p. 437 (*Micrographie*) et p. 394 (*Dilatations*).

Louguinine et Schukareff, *Journal de Chimie physique*, I, 9, 34-1903 (*Chaleur de formation*).

2° ÉTUDE INDUSTRIELLE

Baclé, *Commission des Méthodes d'essais*, 1892 (*Propriétés*).

Guillet, *Revue de Métallurgie*, août 1905 (*Propriétés; trempe*); — *Génie civil*, t. XLVII, n° 9, 1905 (*Id.*).

Girard, *Grande Encyclopédie*, article *Bronze*, Paris, 1890 (*Généralités*).

Hiorns, *les Alliages métalliques* (Traduction Boudouard), Steinheil, 1900, p. 218 (*Fabrication et Propriétés*).

Langhenhove (Van), *Revue universelle des Mines*, Liège, 1889 (*Propriétés*); — *Congrès des Mines et de la Métallurgie*, 1889 (*Id.*).

Moissonnier, *l'Aluminium*, Gauthier-Villars (*Généralités*).

Nicolardot, *le Vanadium* (Collection Léauté) (*Bronzes au Vanadium*).

Ponthière, *les Alliages de cuivre*, Louvain, 1889 (*Généralités*).

Robert, *Société des Ingénieurs du Cleveland*, décembre 1888 (*Fabrication*).

Rousseau, *Encyclopédie chimique*, article *Cuivre*, Paris, 1885 (*Généralités*).

Weiller (L.), *Congrès des Mines et de la Métallurgie*, 1889 (*Id.*).

Tetmajer, *Comptes Rendus de la Station d'essais de Zurich*, livraison IX (*Bronzes d'aluminium complexes*).

CHAPITRE XII

ALLIAGES DE CUIVRE : AUTRES ALLIAGES

Cu-O; Cu-Mn; Cu-P; Cu-Sb; Cu-Bi; Cu-Pb; Cu-Va; Cu-Si; Cu-Cr; Cu-W; Cu-As

---

CUIVRE ET OXYGÈNE

Les rapports qui peuvent exister entre ces deux corps ont une importance industrielle très grande. En effet, l'on sait depuis fort longtemps que l'oxygène que renferme le cuivre est extrêmement nuisible à ses propriétés mécaniques et à celles de ses alliages. Nous avons d'ailleurs vu que l'industrie y remédie en ajoutant un désoxydant, tel que phosphore, aluminium, manganèse, etc.

Lorsque le cuivre en excès se trouve en présence d'air, il donne naissance à de l'oxydule de cuivre Cu^2O.

Dans une communication présentée au Congrès de l'Association des Méthodes d'essais, à Budapest (1901), le docteur Heyn a montré que, si l'on fond ensemble de l'oxydule de cuivre et du cuivre, ces corps se dissolvent mutuellement sans se combiner et donnent au refroidissement un eutectique renfermant 3,5 0/0 d'oxydule, lequel entoure soit le cuivre, soit l'oxydule de cuivre.

Dans une très intéressante note (*Revue de Métallurgie*, avril 1905), M. Giraud a montré l'existence du cas particulier suivant : lorsqu'on examine un lingot obtenu avec un excès d'oxydule, on trouve, au lieu du mélange attendu, oxydule et

eutectique, de l'oxydule et du cuivre *sans eutectique*, ou du cuivre, de l'oxydule et de l'eutectique. — Ces phénomènes sont représentés dans l'*Album de micrographie* (Pl. LXXVII, Phot. 308, et Pl. LXXVIII, Phot. 309 à 312). Quand le cuivre est en excès, on obtient le résultat normal cuivre et eutectique ou eutectique pur.

M. Giraud a expliqué cette anomalie de la façon suivante : au début de la solidification, il se dépose de l'oxydule en grands cristaux arborescents, et le liquide s'appauvrit en oxydule jusqu'à ce qu'il atteigne la composition de l'eutectique. A ce moment du cuivre devrait se déposer, mais il reste en surfusion et l'oxydule seul continue à cristalliser; le mélange liquide devient hypoeutectoïde, et, lorsque la surfusion cesse, il se dépose d'abord du cuivre, puis de l'eutectique.

Quand on provoque une solidification rapide, les cristaux de cuivre disparaissent, et l'on obtient le mélange normal oxydule et eutectique, mais les cristallisations sont toujours moins nettes.

ALLIAGES DE CUIVRE ET DE MANGANÈSE

Étude théorique (Pl. LXXI, Phot. 281 et 282). — L'étude théorique des alliages cuivre-manganèse a été faite par M. Lewis, chimiste de la Muntz's Metal C°, qui a présenté un mémoire fort intéressant à la Société anglaise de l'Industrie chimique (section de Nottingham, 28 mai 1902). Dans la préparation de ces alliages, M. Lewis a utilisé du manganèse préparé par le procédé Goldschmidt, dont l'analyse a donné :

Cu	0,234
Fe	0,309
Al	0,748
Si	1,747
Mn	96,962
TOTAL	100,000 0/0

Courbe de fusibilité. — Voici les points de fusion des différents alliages cuivre-manganèse, d'après les recherches de M. Lewis :

Cu 0/0	POINT DE FUSION	Cu 0/0	POINT DE FUSION
100	1.065	60	800
99	1.080	50	865 et 1.220
95	1.060	40	870 et 1.205
90	1.000	30	880 et 1.210
85	935	20	885 et 1.180
80	915	10	860 et 1.200
75	890	5	1.210
70	885	0	1.280

On remarquera le point de fusion du manganèse métallique, qui était classé parmi les métaux dits réfractaires ; on le regardait comme fondant vers 1.900 ou 2.000°. Nous avons, d'ailleurs, noté, dans le chapitre i, les déterminations plus précises faites par M. Heraeus.

D'autre part, on voit que l'addition de 1 0/0 de manganèse surélève notablement le point de fusion du cuivre.

L'alliage renfermant 5 0/0 de manganèse a un point de fusion plus faible. Il y aurait donc entre ces deux alliages un maximum qui indiquerait une combinaison ou une solution solide, ce qui n'est pas du tout démontré par la micrographie.

Quand on continue à ajouter du manganèse, le point de fusion continue à baisser. L'eutectique se sépare des alliages contenant de 5 à 50 0/0 de cuivre.

Métallographie. — M. Lewis donne les résultats micrographiques suivants :

L'addition de 1 0/0 de manganèse au cuivre n'a aucun effet sur la microstructure de ce métal.

Une addition de 5 0/0 de ce métal fait disparaître les gros cristaux de cuivre, et l'on aperçoit de petits cristaux de ce métal, entourés d'un eutectique de cuivre et de manganèse.

Plus on ajoute de manganèse, plus les cristaux de cuivre deviennent petits, et, à environ 50 0/0 de manganèse, l'alliage eutectique devient le principal constituant.

Si l'on continue à ajouter du manganèse, on aperçoit un nouveau constituant qui est dur et se trouve englobé dans l'eutectique.

Il semble formé par du manganèse renfermant en solution une faible proportion de cuivre. Ce constituant occupe la presque totalité de la masse dans l'alliage à 90 0/0 de manganèse.

Densité. — M. Lewis a déterminé les densités à 15°,5 des alliages renfermant moins de 50 0/0 de manganèse. Pour des teneurs plus élevées, on obtient des alliages remplis de soufflures.

Voici les résultats obtenus :

Cu 0/0	DENSITÉ	Cu 0/0	DENSITÉ
99	8.935	75	7.782
95	8.757	70	7.746
90	8.425	60	7.324
85	8.102	50	7.332
80	8.284		

Étude industrielle. — Fabrication. — Les seuls alliages de cuivre et de manganèse utilisés dans l'industrie, en dehors des cupro-manganèses proprement dits, sont ceux qui renferment moins de 7 0/0 de manganèse.

Le type le plus courant est :

Cu	95,5
Mn	4,5

Ces alliages sont vendus à tort sous le nom de bronze au manganèse.

Leur préparation a lieu en partant d'alliage cuivre-manganèse riche en ce dernier métal.

Examinons donc de suite la préparation de ces alliages riches en manganèse.

La méthode la plus employée autrefois était la suivante :

Le cuivre bien divisé était mélangé avec du charbon de bois et de l'oxyde de manganèse, résidu de la fabrication du chlore, c'est-à-dire de l'action de l'acide chlorhydrique sur le bioxyde de manganèse ou pyrolusite.

Ce mélange, placé dans un creuset et recouvert d'une couche épaisse de charbon de bois, était chauffé à très haute température.

Le manganèse provenant de la réduction s'alliait avec le cuivre, et l'on trouvait le cupro-manganèse fondu au fond du creuset.

On agitait avec soin avant la coulée.

L'opération devait se faire dans un creuset de plombagine, les silicates formant avec l'oxyde de manganèse un laitier très fusible.

A l'heure actuelle, on emploie peu le procédé que nous venons de décrire; cependant on tend de plus en plus à remplacer cette méthode par l'alliage direct du cuivre et du manganèse.

L'industrie fait deux types de cupro-manganèse (alliages riches en manganèse).

Tous deux renferment environ 70 0/0 de cuivre; l'un est sans fer, l'autre en contient de 2 à 5.

Premier type (alliage dit pur) :

Cu................	70 à 72
Mn................	29 à 27
Fe................	1 maximum

Deuxième type :

Cu................	70 à 72
Mn................	25 à 23
Fe................	5 maximum

Voici, d'ailleurs, quelques analyses que nous avons faites de ces produits :

	Cu	Mn	Fe	Si
Alliages impurs.	72,04	23,08	4,37	0,51
	72,15	23,14	4,73	0,20
	73,83	24,18	2,54	0,18
Alliages purs...	70,54	28,32	0,32	0,11
	71,62	29,01	0,15	0,07
	70,31	29,35	0,23	0,08

M. Parson a, d'ailleurs, employé des alliages plus complexes, des cupro-ferro-manganèses. Nous croyons qu'ils ne sont plus usités maintenant.

On les préparait par addition de ferro-manganèse au cuivre.

On fond séparément les deux alliages, et l'on verse le ferro-manganèse liquide dans le cuivre.

La préparation des alliages cuivre-manganèse à basse teneur en ce dernier corps se fait par addition au bain de cuivre du cupro-manganèse.

Cet alliage joue peut-être[1] le rôle d'épurateur, en réduisant l'oxydule de cuivre. D'autre part, le manganèse, toujours mis en excès, amène avec lui des propriétés mécaniques spéciales que nous étudierons plus loin.

Il y a une légère perte de manganèse, qui varie de 0,2 à 1,5 0/0, suivant les fours et la qualité du cuivre employé.

Les alliages de cuivre et de manganèse se laminent très bien à chaud jusqu'à la teneur de 9 0/0 de manganèse. De même, ils s'étirent aisément.

On peut donc, jusqu'à ce pourcentage, obtenir des barres laminées et étirées, même des tubes ou des plaques.

Au delà, le métal crique au laminage.

Propriétés mécaniques. — Voici les résultats que nous avons obtenus aux usines de La Bonneville sur les alliages de

1. Voir plus haut ce qui a été dit pour les bronzes au manganèse.

cuivre et de manganèse, en utilisant un cupro-manganèse extrêmement pur :

COMPOSITION		PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES					
Cu	Mn	R	E	A 0/0	Σ	CHOC	DURETÉ
96,95	2,94	22	10	45	80,8	34	83
95,40	4,40	24	11,5	42	79,3	33	95
93,38	6,56	27,5	13,3	33,5	81,0	32	101

Ces quelques résultats obtenus sur éprouvettes prélevées dans des barres laminées, étirées, puis recuites, montrent bien que le manganèse :

1° Augmente la charge de rupture et la limite élastique ;

2° Diminue un peu les allongements;

3° Donne des strictions extraordinairement élevées ;

4° N'augmente nullement la fragilité ; la diminue même, en détruisant peut-être l'oxydule de cuivre ;

5° Augmente fort peu la dureté.

Il est de toute évidence que les résultats obtenus dépendent de l'état d'écrouissage sous lequel est le métal. Les précédents se rapportent à un métal à l'état de recuit complet.

On peut, par un étirage assez prononcé, obtenir pour l'alliage à 2,94 0/0 de manganèse jusqu'à $38^{kg},00$ de charge de rupture ; pour celui de 4,40 0/0 de manganèse, jusqu'à $42^{kg},00$ de charge de rupture ; enfin, pour celui à 6,56 0/0 de manganèse, jusqu'à 48 et même $50^{kg},00$. Les allongements diminuent nettement ; ils descendent à 12 et 15 0/0. Mais les strictions et la résistance au choc restent toujours extrêmement élevées ($\Sigma = 72$ à 75 ; choc = 26 à 30 kilogrammètres).

On comprendra alors que les Compagnies de chemins de fer demandent au cuivre-manganèse qu'elles emploient :

R........................ 30
A 0/0..................... 33

Les alliages de cuivre et de manganèse ont une autre propriété remarquable : c'est de présenter une grande résistance à haute température. Ce point est tellement important, industriellement parlant, que nous avons jugé nécessaire d'y consacrer un paragraphe spécial à la fin de ce chapitre.

Les alliages de cuivre et de manganèse se laminent très bien à chaud jusqu'à une teneur de 9 0/0 de manganèse. Au delà, ils se brisent au laminoir. Pour une teneur supérieure à 30 0/0, ils sont de très grande fragilité. De 70 à 80 0/0 de manganèse, ils tombent en poussière, dans l'espace de quelques semaines.

Utilisations. — Les alliages de cuivre et de manganèse sont utilisés surtout comme barres d'entretoises dans les locomotives. Ils sont, à l'heure actuelle, employés par les principales Compagnies françaises.

Nous en verrons plus loin les raisons, lorsque nous parlerons de la résistance des métaux et alliages à haute température.

Depuis quelque temps on a mis en essai des tubes en cuivre manganésé ; mais ils n'ont pas encore d'importantes applications.

Le type industriel de l'alliage cuivre-manganèse est celui à 4,5 0/0 de manganèse ; quelques fabricants vont cependant jusqu'à 6 0/0 de ce métal.

ALLIAGES DE CUIVRE ET ANTIMOINE

Etude théorique (Pl. LXXII, Phot. 285 à 288). — La constitution des alliages cuivre-antimoine a été très travaillée. Nous résumerons les principales études.

Courbe de fusibilité. — M. H. Le Chatelier a déterminé la courbe de fusibilité des alliages cuivre-antimoine. Cette courbe se compose de trois branches. La branche intermédiaire présente un maximum qui correspond à la combinaison $SbCu^2$.

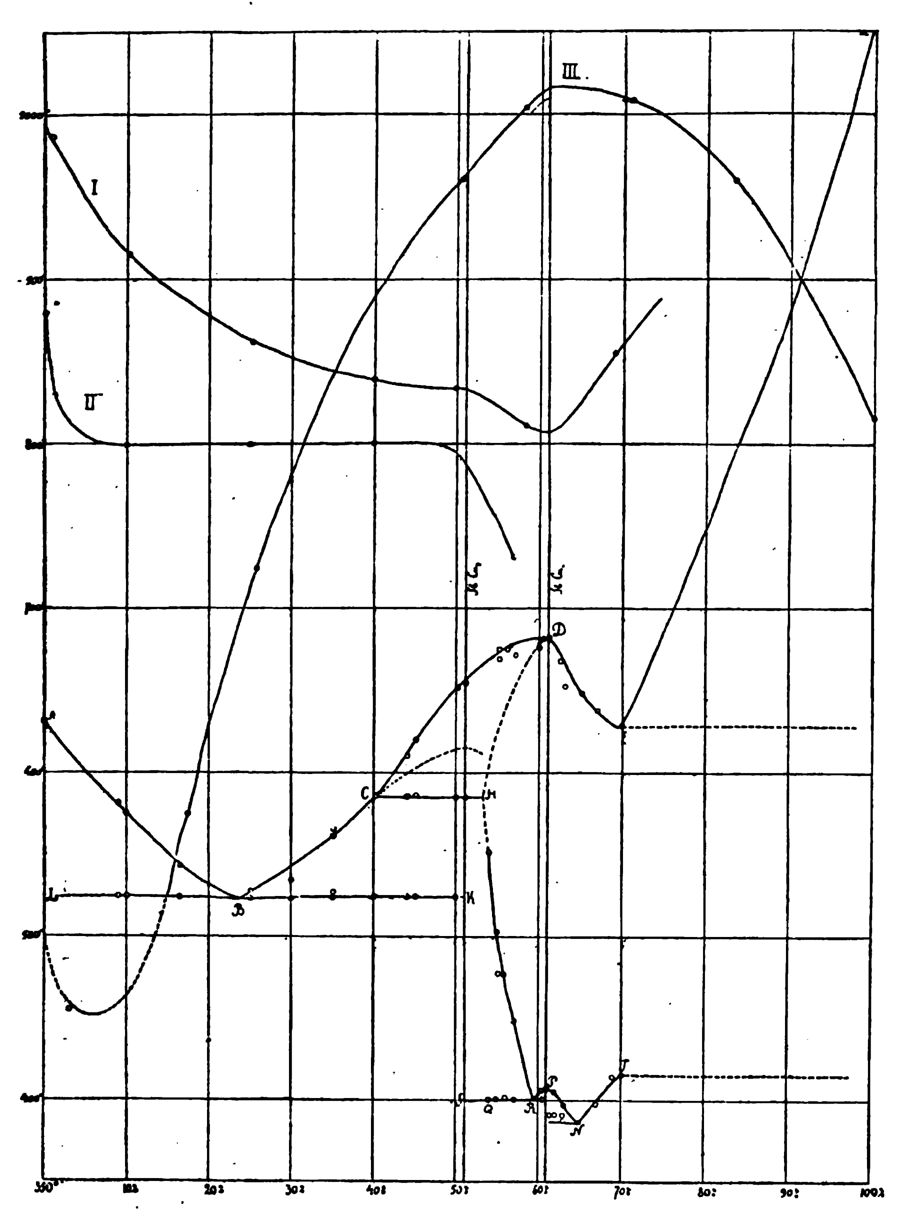


FIG. 181. — Travaux de Baykoff sur les alliages cuivre-antimoine.

ABCDE, courbe de fusibilité. — HRPNT, courbe des transformations. — I, dureté. — II, force électromotrice. — III, dilatation.

Cette courbe met également en vue deux eutectiques qui correspondent à environ 25 0/0 et 70 0/0 de cuivre.

M. Baykoff, dans la remarquable étude qu'il a faite sur les alliages de cuivre et d'antimoine et qui a été publiée dans le *Bulletin de la Société d'Encouragement* (mai 1903), a repris la courbe de fusibilité.

Il a trouvé qu'elle est formée de quatre branches (*fig.* 181) AB, BC, CD et EF.

Chaque branche correspond à la formation d'une phase spéciale :

La branche AB, à l'antimoine ; la branche BC, à la combinaison $SbCu^2$; la branche CDE, à une combinaison $SbCu^3$, ou à des solutions solides que nous définirons plus loin ; la branche EF, au cuivre.

Les combinaisons $SbCu^2$ et $SbCu^3$ ont des propriétés caractéristiques : la première a une couleur violette, la deuxième est gris clair, avec une légère nuance verdâtre.

La combinaison $SbCu^3$ fond à 681° ; elle forme avec le cuivre des solutions solides. Le domaine de ces solutions solides va de 53,5 0/0 à 69 0/0 de cuivre.

La combinaison $SbCu^3$, à 580°, se combine à l'antimoine.

On a la réaction :

$$2SbCu^3 + Sb = 3SbCu^2.$$

Points de transformation. — M. Baykoff a déterminé non seulement les points de solidification, mais encore les points de transformation de ces alliages.

Les alliages de la branche AB ont deux arrêts correspondant à l'antimoine métallique et à l'eutectique ; ceux de la branche BC présentent également deux arrêts qui correspondent à $SbCu^2$ et à l'eutectique. Ceux de la branche CD, compris entre 40 et 51 0/0 de cuivre, donnent trois arrêts : le premier dépend de la composition de l'alliage et correspond à la formation des cristaux $SbCu^3$ (solutions solides). Les deux autres arrêts ont lieu à des températures constantes : l'un, à 584°, correspond à la transformation de $SbCu^3$ en $SbCu^2$; et

l'autre, à la température 524°, correspond à la solidification de l'alliage eutectique, de même composition que celui des branches AB et BC.

Les alliages de 51 0/0 à 53,5 0/0 de cuivre donnent deux arrêts : le premier dépend de la composition de l'alliage et correspond à la formation des solutions solides $SbCu^3$; l'autre, à la température 586°, au point de transformation d'une partie de $SbCu^3$ en $SbCu^2$.

Les alliages de 53,5 à 61 0/0 de cuivre ne donnent qu'un arrêt ; ils se solidifient non pas à température constante, mais dans certaines limites de température. L'alliage à 61 0/0 de cuivre se solidifie à une température constante.

Les alliages de 61 0/0 à 69 0/0 de cuivre donnent un arrêt, mais dans certaines limites de température. C'est la formation des solutions solides Cu-$SbCu^3$.

Enfin, sur la branche EF, on a deux arrêts : Cu et solution solide Cu-$SbCu^3$.

Si l'on observe le refroidissement des alliages solidifiés pour les teneurs comprises entre 53,5 et 69 0/0 de Cu, on trouve deux points d'arrêt, qui sont surtout très visibles, si l'on trace les courbes de la vitesse de refroidissement.

Au-dessous de 61 0/0, on observe des solutions solides Sb-$SbCu^3$.

Au-delà, des solutions solides Cu-$SbCu^3$.

D'ailleurs la transformation concerne non seulement les solutions solides, mais aussi la combinaison $SbCu^3$ elle-même, et plus la composition se rapproche de cette formule, plus les arrêts du pyromètre deviennent longs, et le phénomène de la recalescence s'observe distinctement.

L'expérience prouve que ce phénomène est réversible et que l'alliage reste homogène.

Il faut donc conclure que la combinaison $SbCu^3$ est dimorphe et que son point de transformation est à 407°.

M. Baykoff a désigné ces deux états par les lettres α et β, cette dernière se rapportant à l'état stable au-dessus de 407°.

Le poids spécifique des deux modifications est très dif-

férent. On a trouvé $d = 8,15$ pour ($SbCu^3$) β et 8,48 pour ($SbCu^3$) α.

La trempe empêche la transformation du composé β en composé α.

MÉTALLOGRAPHIE. — M. Charpy a étudié la microstructure de ces alliages; il a été conduit à les diviser en quatre groupes distincts.

PREMIER GROUPE : *Alliages renfermant de* 0 *à* 25 0/0 *de cuivre*. — Ils sont formés par des cristaux d'antimoine entourés d'un eutectique. Au fur et à mesure que le pourcentage de cuivre augmente, la proportion des cristaux d'antimoine diminue. A 25 0/0, on a l'eutectique.

DEUXIÈME GROUPE : *Alliages contenant de* 25 *à* 60 0/0 *de cuivre*. — On a, après simple polissage, des cristaux colorés en violet entourés d'un eutectique. Plus on se rapproche de l'alliage à 60 0/0, plus les cristaux de la combinaison $SbCu^2$ prennent de l'importance. A 60 0/0, la préparation est uniforme.

TROISIÈME GROUPE : *Alliages renfermant de* 60 *à* 70 0/0 *de cuivre*. — On a toujours des cristaux de coloration violette, mais ils sont entourés d'un fin réseau, qui doit être constitué par le second eutectique et qui pénètre parfois dans les grands cristaux.

QUATRIÈME GROUPE : *Alliages contenant plus de* 70 0/0 *de cuivre*. — Ici on ne peut faire apparaître la structure par simple polissage; il faut utiliser l'oxydation.

On voit alors des cristallites englobés dans un eutectique.

Ces cristallites, qui se présentent souvent suivant la même direction, augmentent avec le pourcentage de cuivre. Ces cristallites sont probablement formés par du cuivre pur ou du cuivre ayant dissous un peu d'antimoine.

M. Stead, dans un mémoire publié par le *Journal of Chemical Industry* (janvier 1899) a mis en évidence le composé $SbCu^3$.

M. Baykoff a étudié par voie micrographique les transformations subies par les alliages antimoine-cuivre.

Il a d'abord noté que les alliages antimoine-cuivre renfer-

mant moins de 51 0/0 de cuivre ont une structure indépendante de la vitesse de refroidissement.

Pour les autres alliages, la structure dépend de la vitesse de refroidissement.

On a adopté, comme température de trempe, une température très peu inférieure au point de solidification.

Les alliages renfermant plus de 51 0/0 de cuivre laissent apparaître après trempe des cristallites très nettes.

Si l'on examine des alliages refroidis lentement, on obtient des résultats très différents. On distingue très bien deux éléments.

Un seul alliage reste homogène au refroidissement lent. C'est celui dont la formule correspond à $SbCu^3$.

On sait que l'effet de la trempe sur ces alliages dépend de deux transformations : décomposition de la solution solide, avec séparation de la combinaison $SbCu^2$ et du polymorphisme de $SbCu^3$.

Pour mettre en vue ces deux transformations, on utilise deux modes d'attaque : une attaque faible, montrant le changement du polymorphisme ; une attaque forte, pour montre l'hétérogénéité de l'alliage.

Quand on est en présence d'un alliage à grand excès d'antimoine, l'eau est le meilleur réactif ; la combinaison $SbCu^3$ s'oxyde rapidement. Si l'on attaque ensuite par l'acide chlorhydrique étendu, on dissout les oxydes et l'on découvre un quadrillage très fin dû au polymorphisme.

Dilatation. — M. Henry Le Chatelier a étudié les dilatations des alliages antimoine-cuivre.

Il est arrivé aux résultats suivants, pour lesquels les compositions des alliages sont exprimées en nombre d'équivalents de cuivre sur 100 équivalents du mélange.

Cu 0/0	DILATATION A 63 × 106
100	16,3
95	19,2
90	20,2
85	20
80	19,2
57	14,5
33	15,5
10	9,1
0	10

Pour les alliages riches en antimoine les dilatations sont incertaines, parce que les cristaux d'antimoine ont une dilatation très différente suivant leur axe ou perpendiculairement; or, quand les cristaux atteignent un certain développement, ils prennent une orientation dominante pendant la solidification dans le moule.

La courbe donnant ces résultats est reproduite dans le diagramme général (*fig.* 181).

Résistance électrique. — M. Kamensky (*Philosophical Magazine*, t. XVII, p. 270; 1884) a trouvé un maximum de résistance électrique qui correspond bien à la formule $SbCu^3$.

Force électromotrice de dissolution. — M. Baykoff a trouvé une anomalie correspondant à $SbCu^2$. Il a fait ces déterminations en se servant d'électrodes d'antimoine et de l'alliage et d'une solution $SbCl^3 + HCl$.

Dureté. — M. Baykoff a déterminé la dureté de ces alliages au moyen d'une pointe de diamant supportant un poids déterminé. On mesurait au micromètre l'épaisseur de la ligne creusée. On trouve des points singuliers correspondant aux deux combinaisons SbCu et $SbCu^3$ (*fig.* 181).

Les alliages d'antimoine et de cuivre n'ont que bien peu d'utilité industrielle. La fausse bijouterie utilise cependant un alliage à 3 0/0 d'antimoine qui possède une couleur or superbe.

ALLIAGES DE CUIVRE ET DE PLOMB

Recherches théoriques. — Courbe de fusibilité. — La courbe de fusibilité des alliages cuivre-plomb a été déterminée par M. Roland Gosselin et est reproduite figure 182.

Elle se compose de trois branches ; celle du milieu présente un maximum. Les deux eutectiques qui fondent à 324° et 930° correspondent à 0,14 0/0 et à 50 0/0 de cuivre[1].

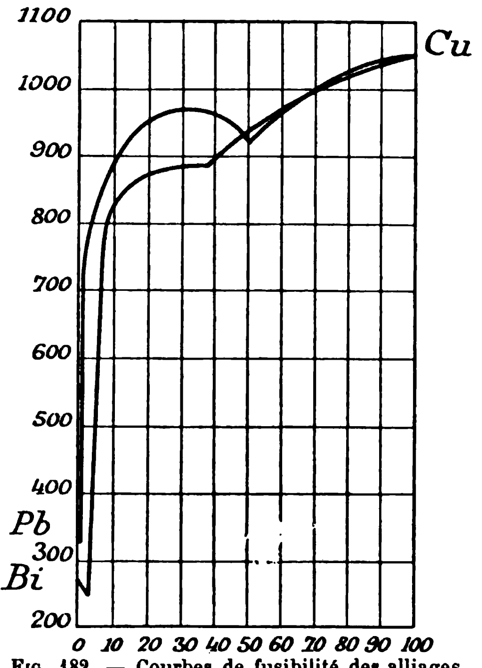


Fig. 182. — Courbes de fusibilité des alliages de cuivre : plomb-cuivre. — Bismuth-cuivre.

Métallographie (Pl. LXXI, Phot. 283 et 284). — La métallographie microscopique ne donne pas les résultats qu'indique la courbe de fusibilité. Dans l'étude que nous avons faite de ces alliages, nous n'avons trouvé ni combinaison ni solution solide à 50 0/0 Cu. Ajoutons que la température de coulée a une influence considérable sur l'homogénéité du métal. Si l'on coule à très haute température dans une lingotière métallique, on obtient une masse homogène. Si, au contraire, on coule à assez basse température, le plomb se sépare complètement du cuivre.

Ces observations, qui nous ont été communiquées par M. le professeur H. Le Chatelier, ont été notées à maintes reprises dans les expériences que nous avons faites.

1. Voir à l'*Appendice* les observations de Roberts-Austen.

Nous donnons deux micrographies, l'une d'un alliage refroidi rapidement, l'autre d'un alliage refroidi lentement (Pl. LXXI, Phot. 283 et 284).

Étude industrielle. — L'industrie n'utilise pas, à l'heure actuelle, d'alliage cuivre-plomb.

Il est bon cependant de rappeler que l'on a employé un alliage comprenant :

Pb........................	80
Cu........................	20

pour couler de grands caractères d'imprimerie.

Actuellement on lance en Amérique un alliage qui a pour composition :

Cu...........................	50
Pb...........................	49
Ni...........................	1

Il est utilisé pour les coussinets, notamment dans les constructions électriques.

Il se passerait ici un phénomène analogue à celui signalé pour les bronzes au plomb.

ALLIAGES DE CUIVRE ET DE BISMUTH

Étude théorique. — Courbe de fusibilité. — La courbe de fusibilité des alliages cuivre-bismuth est représentée dans la figure 182. Elle a été déterminée par M. Roland Gosselin et présente trois branches; celle du centre indique une combinaison, mais la forme de la courbe ne la précise pas suffisamment.

Il existe deux eutectiques fondant à 243° et 885° et correspondant à 2,8 0/0 et 29 0/0 de cuivre.

Métallographie (Pl. LXXIV, Phot. 294 et 295). — Les recherches micrographiques que nous avons faites sur ces alliages ont été suffisamment détaillées pour nous permettre de croire que les conclusions auxquelles est arrivé M. Roland

Gosselin par la courbe de fusibilité ne sont pas justes. En effet, il ne paraît pas exister de combinaisons, mais une ou plusieurs solutions solides. Tous les alliages de cuivre et de bismuth refroidis lentement donnent des cristallites de cuivre englobées dans une masse très riche en bismuth.

Il est à remarquer que, dès qu'on ajoute un peu de bismuth à du cuivre, la zone blanche est bien plus importante que ne le fait prévoir la quantité de bismuth incorporé. Il semble donc que la partie blanche soit une solution bismuth-cuivre.

L'examen des alliages refroidis lentement ne montrent donc pas d'eutectique. Ceci nous a paru en désaccord avec la courbe de fusibilité. Nous avons alors étudié s'il n'y avait pas de transformation pendant le refroidissement au-dessous du point de fusion. Nous n'en avons pas trouvé.

ALLIAGES DE CUIVRE ET DE PHOSPHORE

Étude théorique. — ÉTUDE CHIMIQUE. — Il n'a encore été fait aucune recherche systématique sur les alliages de cuivre et de phosphore. Rose a bien signalé (*Dictionnaire* de Wurtz, p. 1015) l'existence de trois combinaisons; ce sont :

1° *Phosphure tricuivreux* Cu^6P^2. — Qu'il a préparé en faisant passer de l'hydrogène phosphoré sur le chlorure cuivreux chauffé. On a la réaction :

$$3Cu^2Cl^2 + 2PH^3 = 6HCl + Cu^6P^2.$$

On peut l'obtenir aussi en traitant le phosphure tricuivrique par l'hydrogène à une très haute température :

$$2Cu^3P^2 + 6H = PH^3 + Cu^6P^2.$$

C'est une poudre noire ou gris clair, d'éclat métallique, si elle a été fortement chauffée. Elle donne du phosphore au chalumeau. Elle est insoluble dans l'acide chlorhydrique, soluble

dans l'acide nitrique ou l'eau régale en donnant du phosphate cuivrique.

2° *Phosphure tricuivrique* Cu^3P^2. — On l'obtient en faisant passer l'hydrogène phosphoré sur le chlorure de cuivre chauffé ou bien à travers une solution cuivrique :

$$3CuCl^2 + 2PH^3 = 6HCl + Cu^3P^2.$$

Le premier procédé donne une poudre noire ; le second, des flocons noirs qui prennent, quand on les sèche, une couleur rouge brun. Ils ne fondent pas au point de ramollissement du verre, mais ils sont plus fusibles que le cuivre (Landgrebe, *Schweigger's Journ.*, 411, 464).

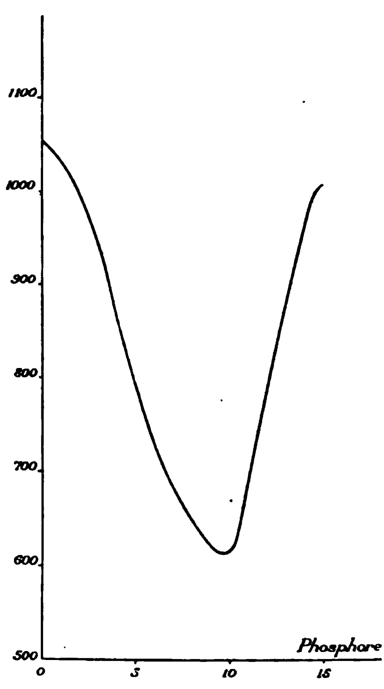


Fig. 183. — Courbe de fusibilité des alliages cuivre-phosphore.

Ces deux variétés se dissolvent aisément dans l'acide nitrique avec production d'acide phosphorique. La seconde est facilement attaquée à chaud par l'acide sulfurique concentré, en dégageant de l'acide sulfureux, et par l'acide chlorhydrique, avec dégagement d'hydrogène phosphoré spontanément inflammable. Cette même variété se transforme à l'air humide en phosphate cuprique. La première donne une flamme phosphorée au chalumeau, la seconde n'en donne pas.

3° *Phosphure dicuivrique* Cu^2P^2. — On l'obtient en faisant passer le gaz hydrogène sur le phosphate de cuivre porté à une haute température.

C'est une poudre grise cristalline. Un mélange de ce corps

avec le chlorate de potasse et le sulfure cuivreux a été employé pour mettre le feu à la poudre par la décharge électrique (Abel, *Chem. Soc. Journ.*, t. XIV, p. 183).

L'étude de la constitution des alliages cuivre-phosphore n'est pas achevée.

Nous donnerons cependant les quelques résultats que nous avons obtenus.

Courbe de fusibilité. — Nous avons déterminé la courbe de fusibilité des alliages cuivre-phosphore jusqu'à 15 0/0 de phosphore (*fig.* 183).

Nous avons utilisé le phosphure du commerce à 15 0/0, et nous l'avons dissous dans des quantités de plus en plus importantes de cuivre.

Voici les résultats que nous avons obtenus :

TENEUR EN Cu 0/0 DE L'ALLIAGE	POINT DE FUSION
97,40	933°
95,32	690
90,66	612
87,96	800
87,45	858
84,73	1015

Métallographie (Album, Pl. LXXIII, Phot. 289 à 292, et Pl. LXXIV, Phot. 293). — On voit qu'un minimum correspond à l'alliage contenant environ 10 0/0 de phosphore. Les alliages renfermant moins de 10 0/0 de phosphore montrent des cristallites de cuivre entourés d'eutectique. A 10 0/0, on a un eutectique très net (Phot. 290). L'une des micrographies que nous donnons reproduit un morceau de cuivre phosphoreux non homogène ; on y note des cristallites de cuivre énormes qui vont en diminuant et sont alors entourées d'eutectique (Phot. 289).

Au-delà de 10 0/0 de phosphore, on voit apparaître de très beaux cristaux, qui sont d'autant plus importants que l'on se rap-

proche plus de la teneur de 14 0/0 ; ces cristaux sont entourés d'eutectique (Phot. 291 et 292).

A 14,5 0/0, on obtient une masse homogène, qui renferme généralement quelques soufflures. L'une des micrographies (Pl. LXXIV, Phot. 293) représente cette combinaison, qui correspond à la formule P^2Cu^6 (Cu = 84,91 = 14,09) ; on y note quelques taches noires provenant des soufflures.

L'attaque de ces alliages a été faite à l'acide azotique.

Étude industrielle. — Fabrication. — Les alliages de cuivre et de phosphore ont acquis une grande importance industrielle, depuis la fabrication des bronzes phosphoreux.

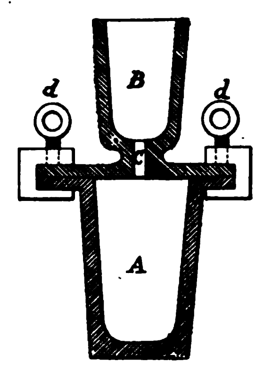


Fig. 184. — Creuset pour la fabrication du phosphure de cuivre.

Nous avons vu, en effet, que le phosphore est introduit dans l'alliage sous forme de phosphure de cuivre ou, plus rarement, de phosphure d'étain.

Pour préparer ces alliages, on emploie l'une des méthodes suivantes :

1° Addition directe du phosphore rouge dans le cuivre fondu ; cette méthode ne peut s'employer qu'avec les plus grandes précautions, en ayant soin d'envelopper le phosphore et de le plonger dans le métal fondu ou en employant des appareils spéciaux ;

2° Réduction du phosphate de cuivre par le charbon de bois, en présence d'un fondant, ou de l'acide phosphorique par le charbon en présence de cuivre. Cette méthode est celle de Fontenay ;

3° Réduction du phosphate de chaux par le charbon en présence de cuivre et de fondants ;

4° Absorption de vapeurs de phosphore par le cuivre. Cette méthode qui, avec la première, est la seule utilisée dans l'industrie, a été indiquée par M. Guillemin. Les lingots de cuivre sont disposés dans des allonges de cornues chauffées au rouge

sombre; on y fait passer, *per ascensum*, des vapeurs de phosphore qui sont absorbées par le cuivre, et il y a formation du composé cristallin P^2Cu^6; on a ainsi la saturation du cuivre par le phosphore à la température de 600 à 800°.

Les méthodes les plus usitées sont les 1° et 4°; pour mettre à exécution la première, on emploie souvent l'appareil suivant décrit par Hiorns :

Dans un creuset en fonte A, on met la quantité convenable de phosphore ; un creuset B est relié au creuset A au moyen de deux serre-joints D, D. Le métal fondu est versé en B et coulé sur le phosphore à travers l'ouverture C. Le phosphore vaporisé ne peut s'échapper qu'à travers le métal fondu; il est alors complètement absorbé (*fig.* 184).

Propriétés. — Dès que le cuivre contient plus de 0,100 0/0 de phosphore, il devient très cassant. Quand on augmente la dose de phosphore, la masse, d'abord rouge, devient d'un gris d'acier.

Les alliages employés ordinairement dans l'industrie contiennent généralement de 9 à 15 0/0 de phosphore.

Ils sont d'un gris d'acier, brisants, à grains cristallins.

On préfère généralement l'alliage à 10 0/0 de phosphore à celui à 15 0/0. En effet le second se brise trop aisément et donne dans la manipulation des déchets importants. Ceci s'explique par la constitution : le premier seul renferme de l'eutectique.

Utilisations. — Le phosphure de cuivre est utilisé comme matière première dans la fabrication des bronzes phosphoreux, c'est là sa principale application. On utilise parfois du cuivre très légèrement phosporeux dans le décolletage et la fabrication du fil; il est plus facile à travailler que le cuivre très pur.

ALLIAGES DE CUIVRE ET DE SILICIUM

Etude théorique (Album, Pl. LXXIV, Phot. 296, et Pl. LXXV, Phot. 297 à 300). — M. Vigouroux a donné, dans sa thèse

de doctorat, sur le silicium et les siliciures métalliques, des détails intéressants sur les alliages de cuivre et de silicium. Un certain nombre d'essais lui ont permis d'obtenir le composé $SiCu^2$, qui est un corps très dur, très cassant, à éclat métallique, dont la densité est de 6,9 à la température de 18°.

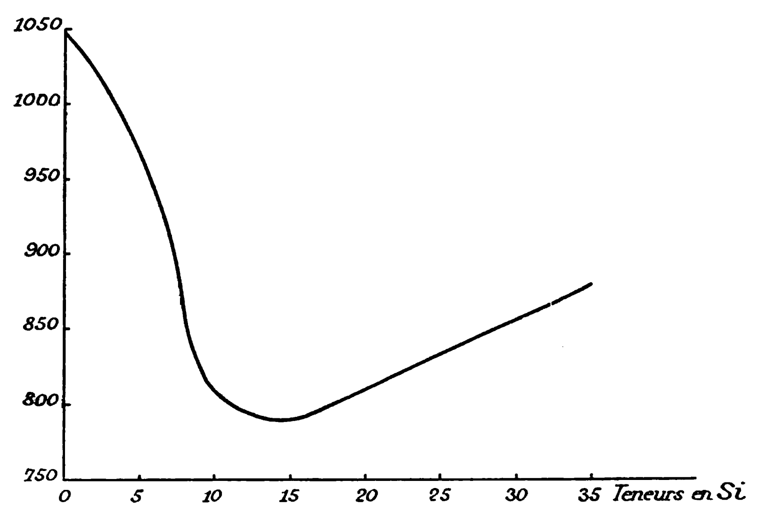


Fig. 185. — Courbes de fusibilité des alliages cuivre-silicium.

Nous avons déterminé la courbe de fusibilité des alliages de cuivre-silicium contenant moins de 35 0/0 Si.

Ces résultats sont résumés dans la courbe (*fig.* 185), qui montre un minimum aux environs de 12 0/0.

La micrographie 296 montre nettement l'existence d'une solution solide cuivre et silicium pour les alliages jusqu'à 7 0/0 Si. Vers 20 0/0, on distingue une combinaison qui apparaît en cristaux très durs légèrement bleutés, et qui augmentent avec la teneur en silicium (Phot. 298, 299, 300). Parfois dans les alliages qui renferment aux environs de 7 à 10 0/0 de silicium on distingue deux solutions qu'on ne peut pas faire disparaître par trempe (Phot. 296).

Étude industrielle. — Le siliciure de cuivre fut préparé

pour la première fois en 1857, par Deville et Caron, qui fondaient du cuivre avec des fluosilicates alcalins.

Actuellement on prépare le siliciure de cuivre au four électrique, comme le ferrosilicium, en réduisant la silice par le charbon en présence de cuivre.

M. Vigouroux a préparé ces alliages en chauffant au four électrique des mélanges de silicium et de cuivre purs.

Les types les plus employés renferment :

10, 15, 20 et 35 0/0 Si.

Une usine du Tyrol prépare même un alliage à 50 0/0 de silicium.

Les alliages de cuivre et de silicium sont d'autant plus durs et cassants qu'ils renferment plus de silicium.

Le siliciure de cuivre est la matière première employée dans un certain nombre de fabrications, à savoir :

1° Dans la fabrication d'alliages cuivre-silicium à faible teneur en silicium ;

2° Dans le raffinage d'un certain nombre d'alliages où le silicium joue, comme nous l'avons déjà expliqué, le rôle de réducteur, notamment des bronzes, des laitons, etc...

Les alliages de cuivre-silicium à faible teneur en silicium présentent un grand intérêt pour la fabrication des fils téléphoniques, pour les canalisations électriques, etc...

Le silicium accroît la résistance sans diminuer sensiblement la conductibilité.

On utilise les alliages cuivre-silicium dans les plaques de foyers de locomotives, dans la fabrication des rivets, des câbles, etc.

Les alliages les plus employés sont les suivants :

Cu	99,98
Si	0,02
Cu	99,95
Si	0,05
Cu	99,90
Si	0,10

Cu........................ 96,5
Si........................ 3,5

Au fur et à mesure que la dose de silicium croît, la conductibilité diminue, mais la résistance augmente. Voici, d'ailleurs, les résultats annoncés pour des fils par divers fabricants, mais l'état d'écrouissage n'est pas indiqué.

COMPOSITION	R	CONDUCTIBILITÉ
Cu pur	28,35	100
0,02 à 0,05 0/0 Si	45	98
0,05 à 0,10 0/0 Si + 1 0/0 Sn	83	43
0,5 0/0 Si	50	28
3,5 0/0 Si	95	7

ALLIAGES DE CUIVRE ET DE VANADIUM

Étude théorique (Pl. LXXVI, Phot. 301 à 304, et Pl. LXXVII, Phot. 305). — Nous avons préparé un certain nombre d'alliages de cuivre et de vanadium, en réduisant par l'aluminium un mélange d'acide vanadique et de cuivre. Bien que cette étude ne soit pas terminée, nous pourrons déjà signaler les trois points suivants :

1° Jusqu'à 7 0/0 de vanadium, le cuivre et le vanadium forment une solution solide, dont la couleur passe du rouge au jaune verdâtre;

2° Pour une teneur plus élevée en vanadium, il se forme un composé blanc bleuté, qui tend à remonter à travers la masse comme le carbure de vanadium dans les aciers (Phot. 304).

Pour des teneurs en vanadium supérieures à 10 0/0 et inférieures à 25 0/0, on obtient des culots hétérogènes, dont la partie supérieure, que l'on détache facilement, est formée du constituant bleuté (Phot. 301). La partie basse est jaune verdâtre.

Pour une teneur en vanadium supérieure à 25 0/0, on obtient des culots gris qui sont assez homogènes. Leur constitution indique l'existence de deux composés (Phot. 302).

Étude industrielle. — Les alliages de cuivre et de vanadium sont préparés soit au four électrique, soit par voie aluminothermique.

L'industrie commence à livrer des alliages renfermant de 3 à 5 0/0 de vanadium.

Ils servent de matières premières pour introduire le vanadium soit dans le cuivre, soit dans les bronzes ou les laitons.

Les alliages de cuivre et de vanadium ne sont pas encore utilisés, du moins en quantités importantes.

ALLIAGES DE CUIVRE ET DE CHROME

Étude théorique (Pl. LXXVII, Phot. 306). — Nous avons étudié les alliages de cuivre et de chrome.

Le chrome ne se mélange pas au cuivre. — Quelle que soit l'importance de l'un ou de l'autre de ces métaux, on les trouve entièrement séparés.

Si le cuivre est en plus grande quantité que le chrome, ce dernier métal forme des paillettes grises que l'on trouve dans la masse métallique et que l'on aperçoit même à l'œil nu.

La micrographie les indique après simple polissage.

De plus, une attaque par l'acide azotique étendu dissout tout le cuivre et laisse tout le chrome intact[1].

Étude industrielle. — On fabrique à l'heure actuelle dans l'industrie des alliages cuivre-chrome, par union directe du chrome au cuivre ou en réduisant l'oxyde de chrome par l'aluminium en présence de cuivre.

Le type courant contient environ :

Cu	55 0/0
Cr	45 0/0

1. Au dernier moment, la Société la *Néo-Métallurgie* m'a confié un cuprochrome à 80 0/0 de chrome environ. Cet alliage renferme le chrome à l'état de solution. Nous en déduisons que le premier produit que nous avons observé était probablement mal préparé.

On fait aussi des alliages cuivre-chrome-manganèse qui seraient plus faciles à dissoudre dans les bains en fusion.

Mais ces alliages sont peu homogènes.

On a cherché à utiliser ces alliages pour faire des bronzes au chrome. Nous avons vu qu'ils n'avaient donné jusqu'ici aucun résultat intéressant.

ALLIAGES DE CUIVRE ET DE TUNGSTÈNE

Étude théorique (Pl. LXXVII, Phot. 307). — Les alliages de cuivre et de tungstène donnent exactement les mêmes résultats que les alliages cuivre-chrome.

L'analyse micrographique accuse du tungstène englobé dans une masse de cuivre.

Étude industrielle. — On trouve, en Allemagne, des alliages de cuivre et de tungstène qui correspondent à la composition

Cu........................	55 0/0
W	45 0/0

Comme le cupro-chrome, le cupro-tungstène est peu homogène.

Ces alliages ont été essayés concurremment à ceux de cuivre et de chrome et n'ont guère eu plus de succès.

ALLIAGES DE CUIVRE ET D'ARSENIC

Étude théorique. — L'étude théorique des alliages cuivre-arsenic a été faite par Hiorns, qui a publié un fort intéressant mémoire dans l'*Electro-Chemist and Metallurgist* (1904) et fait une communication à la Société de Faraday (13 avril 1904).

Nous résumerons ce travail, d'après la *Revue de Métallurgie* de juillet 1904 :

L'objet de ces expériences était d'étudier les relations du cuivre et de l'arsenic. Pour la fabrication de ces alliages, on ajoutait à du cuivre électrolytique fondu des quantités pesées d'arsenic enveloppé dans un morceau de papier; l'on agitait vigoureusement à l'aide d'un morceau de bois carbonisé. Les deux métaux s'unissent énergiquement, et aux faibles teneurs il n'y a que très peu d'arsenic volatilisé. La masse mé-

tallique, recouverte ensuite de charbon de bois pulvérisé, était maintenue pendant une heure à la température d'environ 800° C. Au bout de ce temps, on arrêtait le gaz et on laissait l'alliage se refroidir lentement.

Après refroidissement, le lingot était soigneusement lavé à l'alcool, puis à la potasse, puis rapidement à l'acide nitrique étendu, afin d'obtenir une surface claire pour la photographie.

La surface supérieure des échantillons fut photographiée avec l'éclairage oblique sous un grossissement de 25 diamètres.

En outre, des coupes furent effectuées à travers le culot métallique pour en étudier la structure interne. Ces coupes étaient orientées tantôt parallèlement, tantôt perpendiculairement à la surface de refroidissement dans le but de rechercher si la structure externe était le résultat des effets de contraction provenant de la solidification et du refroidissement accusés par la structure interne. Une contraction de cette nature a été reconnue pour les alliages renfermant jusqu'à 5 0/0 d'arsenic; mais au-dessus de cette teneur jusqu'à 28 0/0, l'analogie n'existe plus. Elle se manifeste à nouveau entre 28 et 32 0/0 d'arsenic.

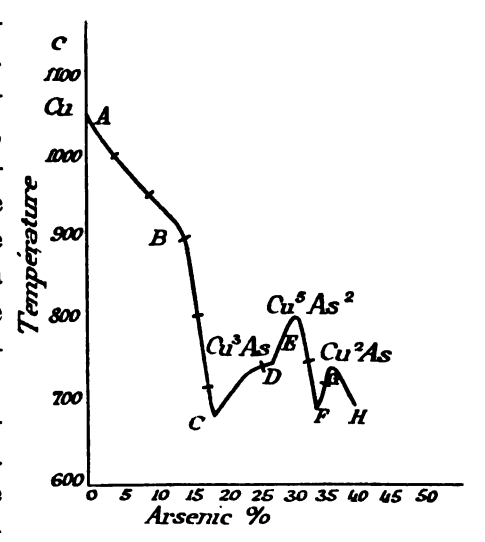


Fig. 186. — Courbe de fusibilité des alliages cuivre-arsenic.

Dans presque tous les cas, l'examen microscopique confirme les indications de la courbe des points de solidification ; on y distingue quatre phases n'existant cependant pas toutes dans un même alliage : ABC, CD, DEF et FGH.

A correspond au cuivre pur (*fig.* 185); D, à l'alliage Cu^3As; E, à Cu^5As^2 ; et G, à Cu^2As presque pur.

Les figures que présente la surface d'attaque dépendent de la position sur la courbe des points de solidification des alliages. Vers le sommet d'une courbe en A, E ou G, par exemple, la section est formée généralement de grains cristallisés parfaitement limités.

Quand, par suite de l'addition de cuivre ou d'arsenic, on quitte le sommet de la courbe, les intervalles qui séparent ces grains s'élargissent et se remplissent d'un réseau d'une substance présentant l'aspect strié caractéristique des eutectiques.

Lorsqu'on arrive au bas d'une courbe, la surface est entièrement formée d'eutectique. Des alliages de cuivre-arsenic, celui qui a le point de fusion minimum est d'un aspect strié extrêmement fin.

Tout écart de composition à partir de l'eutectique provoque l'apparition des grains de l'un des constituants au milieu de l'eutectique. La nature de ces grains varie suivant le côté de l'angle eutectique auquel correspond l'alliage. Les grains cristallisent dès le début du refroidissement et s'orientent souvent suivant des lignes à angle droit les unes des autres, donnant la structure dendritique. Ces grains sont probablement le squelette de cristaux qui se sont graduellement remplis de façon à être de véritables composés chimiques.

Le point de solidification des différents alliages a été déterminé par fusion, dans un creuset percé latéralement d'une ouverture pour l'introduction du couple thermo-électrique. On notait avec soin le commencement et la fin de la solidification.

Courbe de fusibilité. — La figure 186 représente la courbe des points de solidification des différents alliages. La composition est donnée en As pour 100. Les alliages furent analysés et les microphotographies faites avant et après la deuxième fusion.

L'addition d'arsenic jusqu'à 14 0/0 environ abaisse uniformément le point de fusion du cuivre; puis il se produit une chute rapide donnant le point le plus bas à 685°. Cet alliage contient 19,2 0/0 d'arsenic. L'alliage à 22 0/0 d'arsenic se solidifie à 708°. La courbe s'élargit graduellement jusqu'à ce

que l'on atteigne 747° et l'alliage à 28,34 0/0 (Cu^3As), qui offre des caractères particuliers dont nous parlerons à propos de la microstructure.

A 807°, se solidifie le composé chimique Cu^5As^3, 32 0/0 d'arsenic, composé bien défini, ainsi que le montrent sa coloration, sa cassure, son point de fusion, sa structure interne et sa solidification à température fixe.

A partir de ce point, la température descend insensiblement vers un minimum, correspondant à l'alliage renfermant 35 0/0 d'arsenic.

La courbe se relève ensuite jusqu'à 740°, correspondant au composé Cu^2As, 37,24 0/0 d'arsenic. A la température de 702° C., on arrive à l'alliage à 41 0/0 d'arsenic, limite pratique de combinaison directe du cuivre avec l'arsenic.

TABLEAU DES ALLIAGES

NUMÉROS	ARSENIC 0/0	POINTS DE SOLIDIFICATION	REMARQUES
1	0,1 à 0,2		Les températures déter-
2	0,3 à 0,4	entre 1.060	minées d'une façon satis-
3	0,5 à 1,0	et 1.020	faisante sont représentées
4	2,0 à 3,0		par des points sur la
5	4,0 à 5,0	1.010	courbe de solidification.
6	6,0 à 10,0	1.000 à 965	
7	11,0 à 13,0	950 à 920	
8	13,0 à 15,0	920 à 900	
9	16,0 à 18,0	810 à 790	
10	19,0	685	
11	20,0 à 23,0	690 à 720	
12	23,0 à 27,0	720 à 748	
13	28,34	750	composé Cu^3As
14	32,19	807	— Cu^5As^2
15	33,0 à 35,0	780 à 695	
16	37,24	740	— Cu^2As
17	41,0	702	
18	43,0		

MÉTALLOGRAPHIE. — Les culots examinés furent refroidis, les uns très lentement, les autres rapidement. Quelques sections furent pratiquées longitudinalement afin de permettre la comparaison de la structure interne. Le polissage fut fait à sec.

L'examen au microscope se faisait avant et après attaque par de l'acide chlorhydrique contenant un peu d'acide nitrique.

Les descriptions qui vont suivre sont plutôt basées sur ce que l'on aperçoit directement à l'aide du microscope; les photomicrographies, en effet, n'indiquent pas les colorations de ces alliages, qui sont d'un immense secours pour l'estimation des quantités respectives de leurs constituants. Les alliages furent tous examinés à la lumière du jour. Les sections polies, renfermant peu d'arsenic, ont toutes la coloration du cuivre, de plus en plus faible au fur et à mesure que la teneur en arsenic augmente.

Pour l'alliage à 19,2 0/0, la surface présente une faible coloration bleue que l'on remarque jusqu'au moment où on arrive au composé Cu^3As, contenant 28,34 0/0 As et qui est bleu foncé.

Les alliages entre 19,2 et 28,3 0/0 ont une teinte bleu pâle, car le constituant bleu est associé à un constituant plus riche en cuivre, donnant ensemble un mélange eutectique.

L'alliage à 30 0/0 est d'une nuance pourpre faible; avec le composé Cu^5As^2 renfermant 32,2 0/0, on atteint la coloration franchement pourpre, qui persiste en s'affaiblissant jusqu'à la fin.

Pour la plupart de ces alliages, la structure est mise en évidence par un simple polissage; mais elle est accentuée par le liquide d'attaque.

De 0,5 à 19 0/0 environ, les grains diminuent insensiblement et la structure devient plus fine. Le composé Cu^5As^2 avec 32,2 0/0 d'arsenic est entièrement cristallin, et ce genre de structure domine jusqu'à la fin des expériences.

De 0,1 *à* 0,2 0/0 *d'arsenic :* structure analogue à celle du cuivre commercial, constituée par de gros grains polygonaux colorés en noir, formés probablement par une matière eutectique, très tendre, difficile à obtenir absolument exempte de raies. Ces grains sont entourés d'une substance plus dure et plus claire qu'on suppose être une solution solide d'arsenic dans le cuivre variant probablement avec la teneur en arsenic des différents alliages.

De 0,3 à 0,4 0/0 *d'arsenic :* structure analogue à la précédente avec intervalles plus larges et mieux définis et, par places, des points brillants ayant chacun un noyau de la substance plus foncée qui forme la matière des grains plus tendres.

De 0,5 à 1,0 0/0 *d'arsenic :* les intervalles sont plus larges encore, l'intérieur des grains semble être de nature eutectique que nous supposons un mélange de la solution solide et de cuivre métallique.

De 2,0 à 3,0 0/0 *d'arsenic :* les intervalles sont très larges et les intérieurs plus petits et plus oxydables ; le tout semble être sur le même plan.

De 4,0 à 5,0 0/0 *d'arsenic :* l'intérieur des grains est d'une coloration plus pâle que dans les alliages précédents : les intervalles sont de formes irrégulières et, dans la solution solide, on constate la présence d'un nouveau constituant, bleu pâle, sans structure, formant un grand nombre de petites taches irrégulières, parfois réunies par des lignes très fines de la même substance. C'est probablement le composé Cu^3As. Dans un des échantillons, une craquelure très zigzaguée suit d'un bout à l'autre les intervalles brillants et les taches bleues, en traversant entièrement les grains intérieurs.

De 6,0 *à* 10 0/0 *d'arsenic :* la solution solide, dure, légèrement colorée, n'englobe plus les grains de cuivre ou d'eutectique ; elle forme une matrice à travers laquelle se trouvent distribuée des masses ramifiées d'un composé bleu. Or, nous pouvons considérer le corps légèrement coloré comme constitué par des grains dont est déjà formé le composé bleu et arrangé de façon à former des intervalles grossiers. Pour la plus haute teneur, le composé bleu contient un peu d'eutectique.

De 11,0 *à* 13,0 0/0 *d'arsenic :* structure analogue à la précédente avec beaucoup plus du composé bleu.

De 13,0 *à* 15 0/0 *d'arsenic :* refroidis suivant la méthode habituelle, ces alliages ressemblent aux précédents ; refroidis lentement et attaqués par l'acide nitrique étendu, la plupart de leurs masses, légèrement colorées, présentent un aspect strié, formé de couches alternatives de cuivre rouge et d'un consti-

tuant plus légèrement coloré. Les parties bleues contiennent un peu du corps eutectique légèrement coloré et du composé bleu.

De 16,0 *à* 18,0 *d'arsenic :* le composé bleu est de plus en plus associé avec la nouvelle solution solide très légèrement colorée formant le mélange eutectique. Le reste de la solution solide est en forme de masses irrégulières à structure dendritique.

A 19,2 0/0 *d'arsenic :* c'est un mélange eutectique du composé légèrement bleu Cu^3As et de la solution solide légèrement colorée. Ces deux corps cristallisent ensemble à la même température.

De 20,0 *à* 23,0 0/0 *d'arsenic :* la structure eutectique persiste faiblement, mais elle est fragmentée par des polygones du composé bleu, qui maintenant cristallise le premier.

De 23,0 0/0 *à* 27 0/0 *d'arsenic :* les polygones bleus augmentent graduellement en dimensions; une très petite portion seulement de la surface montre un peu d'eutectique entourant les polygones et formant de minces intervalles.

A 28,34 0/0 *d'arsenic :* c'est le composé bleu pâle Cu^3As. Il diffère de tous les alliages précédents par sa coloration plus foncée, beaucoup plus brillante; il se réduit facilement en poudre sous le choc du marteau ou par la pression modérée d'un étau. La surface n'a pas de structure et contient un grand nombre de fissures, généralement droites, orientées dans de nombreuses directions.

A 32,19 0/0 *d'arsenic :* c'est le composé rouge pourpre de formule Cu^5As^2. Il diffère des alliages précédents par sa coloration; mais, au point de vue de la fragilité, il est analogue à celui décrit ci-dessus. La surface du bouton métallique était formée de grands cristaux composés chacun d'un grand nombre d'autres qui peuvent être considérés comme des cristaux secondaires. La surface polie et attaquée a les mêmes caractéristiques. Chaque cristal secondaire est couvert de lignes fines ayant toutes une direction commune pour un même cristal; mais différente d'un cristal à l'autre. Nous pensons que ces lignes sont des lignes de clivage.

De 33 0/0 *à* 35,0 0/0 *d'arsenic :* le composé pourpre occupe la plus grande partie de la masse, car il cristallise le premier; mais il y a également un eutectique dont la quantité augmente avec la teneur en arsenic. Il est composé de stries alternatives blanches et pourpres.

A 37,24 0/0 *d'arsenic :* c'est un composé presque blanc, légèrement teinté en bleu, répondant à la formule Cu^2As. Les grains dont il est composé n'ont aucune structure et sont de forme et de grosseur irrégulières.

De 39,0 *à* 41,0 0/0 *d'arsenic :* la section est constituée de grains polyédriques d'un pourpre pâle, entourés d'un mélange eutectique légèrement coloré en pourpre et en noir qui, dans les alliages à 41 0/0, occupe environ le tiers de la masse.

A 43,0 0/0 *d'arsenic :* une grande partie de la surface est recouverte d'un mélange eutectique, dans lequel on remarque de petites taches pourpres et blanches. Il contient probablement le composé Cu^2As et Cu^3As^2. L'auteur n'a pas pu obtenir ce dernier composé. Cet alliage peut être un mélange mécanique de différents corps.

Les alliages de cuivre et d'arsenic ne présentent aucun intérêt industriel.

On nous a signalé cependant qu'en Angleterre on prépare de l'arséniure de cuivre qui est introduit dans le cuivre pur pour lui donner certaines qualités, notamment de la dureté. Les alliages à très faible teneur en arsenic seraient employés notamment pour les collecteurs de dynamos.

RÉSISTANCE DES ALLIAGES A HAUTE TEMPÉRATURE

L'étude de l'influence de la température sur les propriétés des métaux et alliages est de toute première importance, surtout depuis qu'on utilise la vapeur surchauffée dans l'industrie.

Elle donne, de plus, la solution de plusieurs problèmes des

plus intéressants, à la tête desquels se trouve la fabrication des entretoises.

De nombreuses études ont été faites à ce sujet, par MM. A. Le Chatelier, Thurston, Parker, Roberts-Austen, etc. ; nous nous proposons de résumer les principales.

M. André Le Chatelier, qui a étudié en détails cette question et qui l'a fait considérablement avancer, a publié les résultats de ses recherches dans *le Génie civil* (1891) et dans la *Revue générale des Sciences* (1891) ; il a présenté, de plus, un rapport au Congrès international des Méthodes d'essais des Matériaux de construction, en juillet 1900.

C'est ce rapport que nous résumerons tout d'abord.

Sur le cuivre rouge, M. A. Le Chatelier a trouvé les résultats suivants :

TEMPÉRATURE	DURÉE DE L'ESSAI	R	A 0/0	$\frac{s}{S}$
15	4'	23,1	47	0,375
110	9'	20,4	41	0,303
200	45"	20,4	38	0,377
200	1'50"	18,6	35	0,381
200	10'	17,9	36	0,375
330	10'	15,2	34	0,526
430	8'	12,7	17,8	0,733
530	6'	7,2	16,4	0,777

De ces essais, dont certains font ressortir l'influence de la durée d'expérience, M. A. Le Chatelier déduit, pour la résistance du cuivre rouge pur et complètement recuit, la formule :

$$R = 21 - 0{,}025\ T.$$

Cette formule est applicable jusqu'à 200° et correspond, à cette température, à une résistance de 16 kilogrammes.

Les résultats obtenus pour la striction montrent que la malléabilité du cuivre diminue beaucoup au-dessus de 300°.

M. A. Le Chatelier a fait des expériences sur les *bronzes ordinaires*.

L'Amirauté anglaise avait fait, en 1877, des déterminations qui démontrèrent que certains bronzes éprouvent une perte très notable de résistance vers 200°, tandis que dans le bronze phosphoreux cette chute de la charge de rupture est régulière.

De plus, le professeur Unwin avait obtenu les résultats suivants :

TEMPÉRATURE DE L'EXPÉRIENCE	R	
	BRONZE ORDINAIRE	BRONZE PHOSPHOREUX
15	18,2	25
175	»	19,2
193	19,2	»
208	17,2	»
260	12,3	17,3

La décroissance de la charge de rupture est lente pour le bronze phosphoreux ; elle est rapide au-dessus de 200° pour les bronzes ordinaires.

M. A. Le Chatelier a obtenu les résultats suivants : sur un bronze renfermant 10 0/0 d'étain et 3 0/0 de zinc.

TEMPÉRATURE	R	A 0/0
15	15,90	5,7
140	16,58	7,08
230	14,43	3,9
250	13,16	4,2
300	12,04	2
350	10,95	1,42
415	6,35	»

On voit qu'ici l'influence de la température ne s'est guère fait sentir qu'à 300°.

Bien que les recherches soient assez discordantes, M. A. Le Chatelier admet que le bronze d'étain ne présente pas une

sécurité absolue aux températures de 200°, et il approuve la prescription faite par la Marine de ne pas employer ces alliages dans les pièces destinées à recevoir de la vapeur à une pression supérieure à 15 kilogrammes.

Des recherches ont été faites par le même savant sur le laiton du type :

Cu	70
Zn	30

Les résultats suivants ont été obtenus :

TEMPÉRATURE	DURÉE	R	A 0/0	$\frac{s}{S}$
15	30′	32,6	46,4	0,448
80	5′	31,9	45,5	0,531
160	9′	30,9	42,8	0,567
230	11′	28,06	17,8	0,786
330	5′	22,11	5,7	0,897
330	17′	18,09	2,8	0,931

Il y a une diminution régulière jusqu'à 230°. Au-dessus de 300° il y a une chute très brusque. Quant aux laitons spéciaux, M. A. Le Chatelier rappelle les résultats obtenus au Laboratoire de la Marine ; à 200°, la résistance varie des $\frac{70}{100}$ aux $\frac{85}{100}$ de sa valeur à 15°. A 250°, elle est encore supérieure aux $\frac{60}{100}$ de cette valeur. L'allongement augmente généralement jusqu'à 200°.

Pour le bronze d'aluminium, M. A. Le Chatelier a trouvé qu'entre 80 et 150° il éprouve une perte brusque de propriétés mécaniques. C'est ainsi qu'un bronze d'aluminium à 9 0/0 d'aluminium, ayant une charge de rupture de 40 kilogrammes à 15°, donne 32 kilogrammes à 117° et 17 kilogrammes seulement à 180°.

Enfin le nickel a une charge de rupture constante jus-

qu'à 300°. C'est le seul métal qui soit dans ce cas. Au delà la charge de rupture semble décroître rapidement; mais les expériences faites ne sont pas encore assez précises.

Le regretté Roberts-Austen s'attacha à montrer l'influence des impuretés sur les propriétés à chaud; il prouva notamment que certains corps, comme le bismuth qui ont peu d'influence sur les propriétés du cuivre à la température ordinaire, modifient considérablement les qualités de ce métal porté à une température peu élevée.

M. Charpy (*Bulletin de la Société d'Encouragement*, février 1899) a étudié l'influence de la température sur les propriétés des alliages cuivre-zinc, cuivre-étain, cuivre-aluminium, cuivre-nickel et sur quelques aciers ordinaires et quelques aciers au nickel.

Les plus intéressants des résultats obtenus sont les suivants :

Le laiton Cu = 60 0/0, Zn = 40 0/0, voit croître sa limite élastique, lorsque la température monte, puis diminuer, tandis que la charge de rupture décroît d'une manière continue. Ces propriétés se retrouvent dans la plupart des métaux utilisés industriellement sous le nom de bronze à haute résistance.

Voici les résultats obtenus par M. Charpy :

Le tableau suivant donne les analyses :

NUMÉROS	CUIVRE	ZINC	ÉTAIN	PLOMB	FER	ALUMINIUM	MANGANÈSE	PHOSPHORE
1	58,99	40,27	0,31	0,17	0,06	»	0,30	0,09
2	57,56	41,47	0,10	0,19	0,07	»	0,22	0,11
3	58,90	40,49	0,34	0,22	0,06	1,09	0,13	0,10
4	57,07	42,24	traces	0,17	0,07	0,62	0,15	0,08
5	58,97	40,40	0,05	0,18	0,07	»	0,18	0,08
6	56,20	42,95	0,11	0,13	0,05	»	0,33	0,07
7	58,04	40,10	0,32	0,07	0,05	»	0,21	»

Les résultats obtenus sur éprouvettes prélevées dans des barres coulées ont été les suivants :

TEMPÉRATURE	MÉTAL N° 1				MÉTAL N° 2				MÉTAL N° 3				MÉTAL N° 4			
	LIMITE élastique	CHARGE maxima	Allongement 0/0	CONTRACTION	LIMITE élastique	CHARGE maxima	Allongement 0/0	CONTRACTION	LIMITE élastique	CHARGE maxima	Allongement 0/0	CONTRACTION	LIMITE élastique	CHARGE maxima	Allongement 0/0	CONTRACTION
degrés 15	8,0	38,6	42,0	0,620	8,7	36,4	26,0	0,793	8,7	38,7	32,3	0,657	»	39,5	25,0	0,731
100	12,0	34,7	45,0	0,635	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
150	12,0	30,8	43,0	0,577	13,0	30,0	41,0	0,546	»	»	»	»	15,4	30,8	30,0	0,705
200	»	27,8	52,4	0,567	14,0	24,8	48,4	0,452	14,0	28,7	40,0	0,600	12,7	26,8	42,0	0,635
225	12,0	23,97	46,0	0,556	14,0	24,8	52,0	0,450	8,7	24,6	31,0	0,682	14,0	23,5	37,3	0,589
250	12,0	21,4	41,5	0,611	12,0	20,5	52,8	0,514	8,0	21,8	26,0	0,682	14,0	21,4	37,5	0,635

TEMPÉRATURE	MÉTAL N° 5				MÉTAL N° 6				MÉTAL N° 7			
	LIMITE élastique	CHARGE maxima	Allongement 0/0	CONTRACTION	LIMITE élastique	CHARGE maxima	Allongement 0/0	CONTRACTION	LIMITE élastique	CHARGE maxima	Allongement 0/0	CONTRACTION
15	13,5	35,9	15,0	0,872	12,7	38,5	8,4	0,913	21,0	44,0	16,2	0,859
100	21,7	35,4	27,3	0,717	18,0	41,4	13,6	0,846	17,4	37,4	11,7	0,850
150	15,4	34,1	34,7	0,577	20,0	37,4	29,0	0,717	16,0	36,4	19,7	0,819
200	15,4	30,8	47,5	0,546	22,0	29,4	44,0	0,492	18,0	34,0	40,0	0,611
225	15,4	28,1	46,5	0,546	21,4	27,4	40,8	0,361	17,4	32,1	40,2	0,600
250	17,4	26,7	55,0	0.600	19,4	25,4	65,2	0,310	18,0	28,7	45,2	0,534

Voici les résultats sur des éprouvettes coulées en un métal de composition

Cu	58,59
Zn	40,67
Pb	0,39
Al	0,20

TEMPÉRATURES	R	E	A 0/0	Σ
15	41,4	11,9	31,2	64,8
100	36,1	13,6	32	68,2
150	31,9	12,3	35,1	57,0
200	29	14,14	42,3	50,8
214	28,0	13,0	38,8	54,6
225	27,1	15,0	34,0	60,0
250	24,8	14,8	28,0	69,0

Enfin, voici les résultats sur certains alliages de même nature, mais laminés et étirés.

Les numéros 1, 2 et 3 ont été recuits avant l'essai.

Les numéros 4, 5 et 6 ont été pris bruts d'étirage.

NUMÉROS	A 15°				A 150°				A 200°			
	LIMITE ÉLASTIQUE	CHARGE MAXIMA	ALLONGEMENT	CONTRACTION	LIMITE ÉLASTIQUE	CHARGE MAXIMA	ALLONGEMENT	CONTRACTION	LIMITE ÉLASTIQUE	CHARGE MAXIMA	ALLONGEMENT	CONTRACTION
1	14,5	37,7	33,6	0,705	14,7	34,1	58,6	0,425	15,0	31,4	61,8	0,404
2	13,7	40,6	48,5	0,528	14,6	34,6	50,8	0,586	14,2	31,8	54,8	0,421
3	13,5	40,0	47,6	0,511	13,2	33,9	54,7	0,553	14,2	31,1	58,6	0,511
4	21,4	45,6	27,0	0,483	23,4	42,1	27,8	0,462	20,4	39,4	32,6	0,473
5	22,4	48,8	22,4	0,564	23,7	43,4	26,5	0,501	21,7	40,7	22,6	0,678
6	21,2	47,1	23,1	0,543	21,1	40,7	28,0	0,531	21,7	33,8	28,0	0,521

Pour les bronzes contenant moins de 12 0/0 d'étain, les seuls que l'industrie utilise pour des pièces autres que celles sou-

mises au frottement, la raideur et la fragilité diminuent beaucoup, lorsque la température s'élève ; la cassure qui, à froid, est jaune et à grains relativement fins, est blanchâtre à chaud présente de grandes facettes planes.

Des essais à la traction faits sur un bronze renfermant

Cu	88,11
Sn	10,05
Zn	1,62

ont prouvé que la limite élastique et la résistance diminuent toutes deux à haute température. L'allongement présente un maximum vers 150° et diminue rapidement.

Les bronzes d'aluminium présentent très peu de fragilité à chaud, et leur raideur augmente avec la teneur en aluminium.

Les alliages de cuivre et de nickel sont fragiles à chaud, même lorsqu'ils ne renferment pas de zinc. Cependant il est à noter que ce métal augmente la fragilité.

Pour l'acier, M. Charpy a montré que la limite élastique diminue d'une manière continue, lorsque la température s'élève, tandis que la charge de rupture augmente, passe par un maximum, puis décroît.

Et M. Charpy conclut :

De l'ensemble des essais effectués, on peut déduire un classement approximatif de différents métaux étudiés; les moins bons sont les bronzes d'étain, dont la fragilité augmente rapidement quand la température s'élève. Viennent ensuite les alliages de cuivre avec 30 0/0 de zinc dont la raideur diminue beaucoup à chaud, au point de devenir inférieure à celle du cuivre rouge et qui sont fragiles à chaud; les laitons à 40 0/0 de zinc présentent des propriétés beaucoup plus remarquables; mais ils restent encore inférieurs aux maillechorts et aux bronzes d'aluminium.

Les aciers ordinaires ne présentent pas, à chaud, la supériorité qu'ils possèdent à froid sur les alliages de cuivre; mais cette supériorité reparaît nettement dans les aciers au nickel,

qui participent à la fois des propriétés des alliages et de celles des aciers.

M. Le Blant a présenté au Congrès international des Méthodes d'essais de Paris, 1900, un rapport qui avait pour but de définir le meilleur métal pour entretoises.

On sait que les entretoises sont les pièces filetées qui, joignant les deux parois des foyers de locomotives, permettent à ces grandes surfaces de supporter des pressions qui s'élèvent jusqu'à 16 kilogrammes par centimètre carré.

Les conclusions du travail de M. Le Blant sont les suivantes :

Les essais à la traction montrent que :

1° Sauf pour l'acier, qui passe par un minimum de résistance vers 80° et par un maximum vers 200°, les limites élastiques et les charges de rupture décroissent régulièrement avec la température jusqu'au moment où le recuit est influencé par la température ;

2° Les allongements décroissent avec la température, passent par un minimum, puis croissent jusqu'aux températures de forge probablement. L'acier présente son minimum à une température beaucoup plus basse que les autres, vers 150° ;

3° Que le métal le moins sensible à la chaleur est le cupro-manganèse. Les plus sensibles sont les cupro-aluminiums, l'acier entre 100 et 200° étant mis à part.

Les essais de cisaillement ont prouvé que :

1° Plus le métal est résistant à la traction, plus il donne d'oscillations, sans rupture, sauf pour l'acier à chaud et le cuivre recuit qui est influencé plus que les autres par la tension ;

2° Que la sensibilité des cupro-aluminiums à la chaleur se conserve à cet essai, le peu d'influence de la température sur le cupro-manganèse restant le même.

De ces considérations et des essais faits en service, M. Le Blant conclut :

« Dans l'état actuel de la question (acier réservé), le métal qui donne le moins de rupture est le cupro-manganèse. Mais il se comporte mal sous l'action des flammes. Il doit donc être réservé pour les lignes d'entretoises, qui se cassent le plus

souvent et se trouvent d'ailleurs les plus éloignées du combustible en ignition.

« Le meilleur est ensuite le cuivre rouge, pour lequel la résistance à la traction doit être limitée entre un maximum et un minimum On évitera aussi le cuivre recuit et le cuivre trop écroui. »

Les alliages de cuivre-aluminium qui avaient donné de très bons résultats dans les essais de laboratoire, ont été reconnus les plus mauvais dans la pratique.

La question des entretoises est de toute première importance; aussi a-t-elle donné lieu à d'autres études intéressantes, parmi lesquelles nous citerons tout spécialement le mémoire de M. Webb, présenté à *The Institution of Civil Engineers* (1903) et que nous résumons d'après la *Revue de Métallurgie* (mai 1904).

On emploie aujourd'hui des chaudières de locomotives à 14 kilogrammes par centimètre carré et au dessus, munies de grands foyers en cuivre avec enveloppes en tôle d'acier renforcées, et l'on a été amené ainsi à chercher s'il ne convenait pas de substituer au cuivre, pour la fabrication des entretoises de foyer, un métal permettant de diminuer les chances de ruptures ou d'usure rapide.

Les essais ont porté sur cinq espèces d'entretoises de métaux différents, savoir :

1°	Alliage contenant	60 0/0 de cuivre,		40 0/0 de zinc.	
2°	—	91	—	9	—
3°	—	97	—	3	d'étain.
4°	—	92,75	—	7,25	d'aluminium.
5°	Acier doux Bessemer.				

Toutes ces entretoises ont été essayées sur des machines timbrées à $10^{kg},5$, affectées au service des voyageurs ou des marchandises. Leur diamètre était de $25^{mm},4$, et elles étaient rivées à la manière ordinaire par le même procédé que les entretoises en cuivre.

Alliages contenant 60 0/0 *de cuivre et* 40 0/0 *de zinc.* — Ces entretoises ont été appliquées, en 1897, à une machine à voyageurs.

Le foyer comportait 646 entretoises. Après un parcours de 421 kilomètres par entretoise, le foyer fut démonté. Les entretoises ont pu être retirées du foyer au moyen d'un très léger coup de marteau, car le tartre dont elles étaient entourées les retenait seul, les têtes et les filets étant fortement usés, ce qui expliquait les fuites importantes de la chaudière. Toutes ces entretoises présentaient des criques partant d'un certain nombre de fonds de filets et orientées vers la tête sous un angle de 45° environ. Les échantillons prélevés au milieu, sur le bord et sur la surface de la tête ont donné à l'analyse des résultats sensiblement identiques.

Alliage contenant 91 0/0 *de cuivre et* 9 0/0 *de zinc.* — Cet alliage fut employé pour les entretoises montées sur un foyer de machine à marchandises à six roues accouplées. De septembre 1891 au 31 décembre 1901, on constata la rupture de 14 entretoises, et 37 furent retirées pour usure des têtes et fuites; la machine avait parcouru 458.619 kilomètres, ce qui représente un parcours moyen de 8.993 kilomètres par entretoise.

ÉLÉMENTS	TENEUR	OBSERVATIONS
Cu	89,75	Résistance à la traction, 31 kilog. par mm².
Zn	9,09	Allongement 0/0, 55 0/0 sur 51 millimètres.
Sn	0,76	Striction, 64 0/0.
Pb	0,08	
P	0,03	
Fe, Mn, As	traces	
TOTAL	99,71	

Ces entretoises ont donné de bons résultats sur 7 machines similaires, et la moyenne de durée des entretoises, calculée sur dix années de service (septembre 1891 à décembre 1901), est de 2.905 mètres.

Alliages contenant 97 0/0 *de cuivre et* 3 0/0 *d'étain.* — Une

machine à marchandises identique aux précédentes avait reçu, en 1897, des entretoises en alliage de cuivre et d'étain. De juillet 1897 à mars 1901, cette machine avait parcouru 150.134 kilomètres, et on avait retiré 145 entretoises non rompues, mais dont les têtes étaient usées ou qui avaient pris du jeu dans leurs trous.

Au 31 décembre 1901, le parcours total était de 182.910 kilomètres soit un parcours moyen de 1.261 kilomètres par entretoise. Les quatre chaudières munies de ces entretoises sont trop récentes pour que l'on puisse tirer de ces essais une conclusion définitive.

Alliage renfermant 92,75 *de cuivre et* 7,25 0/0 *d'aluminium.* — Cet alliage très pur, qui ne contenait que des traces très légères de phosphore, était considéré jusque-là comme très convenable pour la fabrication de pièces exposées à la chaleur et à des efforts très variables ; son emploi donna lieu cependant à un insuccès complet.

Au bout de deux mois de service (janvier à avril 1901), la machine fut retirée du service après un parcours de 3.860 kilomètres, parce que beaucoup d'entretoises étaient rompues dans les plaques en cuivre et en acier; de plus, l'arrachement d'un certain nombre de têtes avait provoqué la déformation des plaques en cuivre.

Les extrémités rompues présentaient tantôt une cassure irrégulière avec de grandes faces cristallines, tantôt une cassure plus régulière formée de cristaux plus petits sans que cette différence suffise pour expliquer les ruptures, car 12 entretoises sur 18 offraient une structure à cristaux relativement petits.

Acier doux Bessemer. — Une machine à voyageurs munie d'entretoises en acier doux Bessemer fut mise en service pour essai en janvier 1889. Au bout de trois ans, on avait remplacé 287 entretoises par d'autres en cuivre. De juillet 1892 à juillet 1897, on en remplaça 239; puis 32, de juillet 1897 à juin 1899. Finalement la chaudière fut démolie après 548.517 kilomètres de parcours total. Il était impossible de maintenir un joint étanche dans les plaques en cuivre avec ces entretoises en

acier doux, dont les unes étaient massives (rivetage) et les autres percées (mandrinage).

L'auteur a procédé à des essais afin de déterminer la température que peuvent atteindre les entretoises dans un foyer. Une chaudière fixe du type locomotive normal fut munie à cet effet de sept entretoises en métaux différents, dont cinq étaient perforées d'un trou axial ayant 13 millimètres de profondeur (extrémité du côté du foyer) ; pour deux autres, la profondeur de perforation était de 51 millimètres ; elles dépassaient la face intérieure de la plaque de cuivre de $6^{mm},3$. Les températures étaient déterminées au moyen d'un pyromètre électrique portatif de M. H. Le Chatelier, comportant un couple thermo-électrique platine-platine rhodié.

La chaudière d'essai était timbrée à $8^{kg},4$.

La température de la vapeur saturée à la pression de $8^{kg},4$ est de 176°.

Des essais ont également été faits en vue de déterminer la température de la plaque de cuivre à la surface et celle des extrémités des entretoises à l'intérieur du foyer près de la voûte en briques, que l'on avait isolée soigneusement.

NUMÉROS	MÉTAL DES ENTRETOISES	TEMPÉRATURES	
		VAPORISATION ABONDANTE	FAIBLE VAPORISATION
	Entretoises perforées jusqu'à 13mm à partir de l'extrémité, côté foyer		
1	Cuivre	215°	185°
2	Bronze (97 0/0 de cuivre et 3 0/0 d'étain)	215	190
3	Laiton (60 0/0 — et 40 0/0 zinc)	220	185
4	Cupro-aluminium (93 cuivre et 7 0/0 aluminium)	230	190
5	Acier doux Bessemer	215	185 —
	Entretoises perforées jusqu'à 51mm à partir de l'extrémité, côté foyer		
1		170	170 —
2		175	165 —

Résistance à la traction. — M. Webb fit une série d'essais pour déterminer la résistance à la traction des alliages en cause aux températures de 50°, 90°, 150°, 205°, 360°, 215°, 370° et 400° C.

La composition chimique des divers alliages est donnée par le tableau suivant.

ÉLÉMENTS	ALLIAGE n° 1	ALLIAGE n° 2	ALLIAGE n° 3	ALLIAGE n° 4	ALLIAGE n° 5 (Acier doux)
	Pour 100	Pour 100	Pour 100	Pour 100	Pour 100
Cu	99,76	97,07	60,23	92,91	
As	0,20		0,10		0,04
Ni	0,04				
S	0,01				0,03
P	0,01	0,02	traces (P, Pb)		0,07
Pb					
Fe					
Sb	traces (Fe, Sb, Zn)		0,28		99,20
Zn			0,01		
Mn			39,61		0,48
Al			0,03	7,13	
Sn		2,91			
Si					0,05
C (combiné)					0,13
	100,02	100,00	100,26	100,04	100,00

On fit trois essais sur chacun des alliages numéros 1 à 5. Les éprouvettes avaient 127 millimètres de longueur et 14mm,3 de diamètre; on mesurait l'allongement sur 51 millimètres de longueur.

Les éprouvettes avaient une structure uniforme et homogène, sauf celles en alliages de cuivre et aluminium, qui présentaient les unes de gros cristaux, d'autres de petits cristaux ; quelques-unes, enfin, étaient composées d'un mélange de petits et de gros cristaux.

On chauffait les éprouvettes, pour les températures comprises entre 370° et 400°, dans un bain comportant un cylindre en cuivre, dans lequel sont maintenus sept tubes en cuivre de 25mm,4 de diamètre ; l'ensemble est fixé sur le support in-

férieur de la machine d'essai au moyen d'un écrou et d'une vis de réglage.

Deux feuilles d'asbeste recouvrent l'enveloppe extérieure du bain et le tube de support; on isole les interstices avec de la laine d'asbeste.

Un bec de Bunsen annulaire sert à chauffer le bain. Pour les températures comprises entre 95 et 315°, on employait le bain d'huile décrit par M. J.-A.-F. Aspinall dans son *Rapport à la Commission des Alliages* lu devant l'*Institution of Mechanical Engineers* (*Proceedings*, 1893, p. 102) ; les températures étaient déterminées au moyen d'un thermomètre à mercure.

Afin d'obtenir des températures uniformes, on maintenait les éprouvettes à la température d'essai pendant une demi-heure avant le début d'application de la charge que l'on appliquait graduellement, de manière à produire la rupture au bout de quinze minutes environ.

Les tableaux suivants montrent les résultats des essais.

TÉNACITÉ D'ALLIAGES DE CUIVRE ET D'ALUMINIUM LAMINÉS
A 7,1 0/0 D'ALUMINIUM

TEMPÉRATURES	PETITS CRISTAUX KILOGRAMMES PAR MILLIMÈTRE CARRÉ	GRANDS CRISTAUX KILOGRAMMES PAR MILLIMÈTRE CARRÉ
15 degrés	44 kilogrammes	41 kilogrammes
200 —	41 —	35 —
400 —	20 —	16 —

ALLIAGES	TEMPÉRATURE	TÉNACITÉ KILOGRAMMES par millimètre carré	ALLONGEMENT 0/0 SUR 51 MILLIMÈTRES	STRICTION
	degrés	kilogrammes	pour 100	pour 100
N° 1	15	22	60	73
	200	17,5	55	73
	400	10	10	20
N° 2	15	30	62	78
	200	30	55	76
	400	20,5	20	35
N° 3	15	42,5	50	58
	200	31,5	55	40
	400	8	20	48
N° 4	15	40	90	72
	200	35	75	55
	400	16	12	15
N° 5	15	43	40	60
	200	50	23	55
	400	40	30	70
N° 6	15	28	40	78
	200	23	27	75
	400	15	30	78

Les essais aux différentes températures ont donné des résultats dont la similitude prouve l'uniformité de structure des barres pour entretoises essayées, sauf en ce qui concerne le cupro-aluminium.

Les cassures du cuivre ordinaire et du bronze présentent une apparence très nette de métal fondu aux températures égales ou supérieures à 315° ; à 260° et au dessus, les cassures du laiton et du cupro-aluminium ont sensiblement le même aspect.

En ce qui concerne le cupro-aluminium, les résultats des essais de résistance à la traction subissent l'influence des différences de structure de l'alliage.

Pendant les essais à des températures égales ou supérieures à 205°, l'allongement de l'éprouvette était accompagné d'un grincement aigu dû au développement de criques transversables variables, dont l'existence prouve que le métal manque de ductilité à des températures élevées.

Rivetage d'entretoises en cuivre ou en alliages de cuivre dans les plaques de foyers. — Pour déterminer si les criques qui s'étaient développées au fond des filets des entretoises en laiton non étanches étaient dues au rivetage au moment de la pose ou au mandrinage en service, M. Webb fit confectionner avec les alliages dont nous avons donné plus haut la composition des entretoises qui furent rivées dans une plaque de foyer.

Ces entretoises, découpées dans la plaque avec le cuivre entourant la partie filetée, furent tranchées ensuite dans le sens de la longueur, polies, puis attaquées par un acide. L'entretoise en cuivre avait donné seule un joint satisfaisant; dans le cas des entretoises en alliages, les filets ne portaient qu'imparfaitement sur ceux de la plaque, qui d'ailleurs se détacha toute seule, une fois découpée, au lieu de rester adhérente comme dans le cas du cuivre. La texture des alliages n'était pas sensiblement modifiée par le rivetage.

En résumé, dans le cas des entretoises en alliages, le trou percé dans la plaque en cuivre se dilate sous l'influence du

rivetage, et la plaque se détériore sous la tête d'entretoise.

D'ailleurs, cet essai recommencé avec des entretoises mises en service sur une locomotive, a donné des résultats concordants avec ceux que nous venons d'exposer.

Ces essais de rivetage ont montré que l'élément important de cette question est la dureté relative du métal de l'entretoise et de celui de la plaque dans laquelle elle est rivée. L'arsenic joue ici un rôle prépondérant en donnant au métal une certaine dureté.

Il a été prouvé qu'avec une plaque et des entretoises contenant respectivement 0,55 0/0 et 0,34 0/0 d'arsenic, on obtenait un joint bien supérieur à celui que l'on avait pu réaliser dans le cas de teneurs en arsenic n'atteignant que 0,21 et 0,26 0/0.

La dureté relative du métal employé pour ces essais a été déterminée sur des entretoises à petits cristaux au moyen de l'épreuve de dureté par entailles (Prof. W.-C. Unwin, *Min. of Proc. Civil Engin.*, vol. CXXIX, p. 334). Trois essais furent effectués avec chaque éprouvette.

Soit P la charge, et i la profondeur de l'entaille. Le coefficient de dureté est donné par la formule :

$$C = \frac{P \times 1,2}{i}.$$

Les résultats de ces essais sont donnés par le tableau suivant :

DÉSIGNATION DES ÉPROUVETTES	LARGEUR DE L'ÉPROUVETTE en millimètres	COEFFICIENT MOYEN de dureté
Cuivre barre laminée	12,27	84,8
Bronze	12,55	110,0
Laiton	12,55	166,5
Cupro-aluminium (gros cristaux)	12,55	93,2
— (petits cristaux)	12,24	120,4
Acier doux Bessemer	12,27	197,3

La pression a pour résultat de refouler les cristaux sur les côtés des éprouvettes.

En résumé, l'emploi d'une entretoise dure et d'une feuille de cuivre tendre amène l'agrandissement du trou et empêche de réaliser un joint satisfaisant. On peut expliquer ainsi ce fait que des entretoises en laiton neuves donnent lieu à des fuites : souvent on a constaté qu'en vissant une entretoise dure dans une plaque en cuivre on coupait et amincissait les filets de la plaque.

M. Webb tire de son étude cette conclusion que l'entretoise doit être en métal plus doux que la plaque de foyer en cuivre dans laquelle elle doit être rivée.

La discussion du mémoire de M. Webb a donné lieu à une série d'observations intéressantes sur le métal des entretoises et les conditions de service nécessaires pour que les machines ne donnent pas lieu à des fuites et à des détériorations prématurées.

M. J.-A.-F. Aspinall signale qu'évidemment le métal de l'entretoise doit être plus doux que celui de la plaque, mais que celui-ci doit être d'une dureté suffisante, sans exagération, pour éviter les criques aux emboutis et entre les trous des tubes ; à cet effet, il est bon de choisir, pour la confection des plaques, des cuivres renfermant une légère proportion d'arsenic. Les entretoises en acier ne semblent convenir que pour des machines affectées au trafic local à faible vitesse.

M. Dobson remarque que les entretoises en cuivre manganésé ont donné de bons résultats en France et en Hongrie, et qu'il serait intéressant de les essayer en Angleterre. Le point de fusion très bas du zinc est probablement la cause des insuccès obtenus avec les alliages riches en zinc.

M. Webb a reçu, en réponse à un certain nombre de questions posées par lui lors de la préparation de son mémoire, des lettres d'un certain nombre de ses collègues anglais, français et autres. M. du Bousquet, du Nord français, a signalé les bons résultats obtenus avec les entretoises en cuivre manganésé sur des machines à timbre élevé. M. S. Drummond

(London et Southwestern) attire l'attention sur l'élévation de la température dans les foyers des machines puissantes à grande vitesse, qui peut atteindre, selon lui, 1.100° C. Il estime que le perçage des entretoises sur une profondeur égale aux deux tiers de l'épaisseur de la plaque donne de très bons résultats, car il permet de remplir parfaitement les filets de la plaque en élargissant l'entretoise avec une broche conique.

M. S.-W. Johnson, du Midland, a constaté aussi que la résistance à la traction des alliages qu'il a expérimentés diminuait quand la température s'élevait; les eaux d'alimentation de mauvaise qualité usent rapidement par corrosion les entretoises en bronze. Selon M. S.-W. Johnson, la ductilité et la résistance ne sont pas les seules propriétés importantes d'un métal pour entretoises. Il faut que ce métal résiste à l'action corrosive des gaz chauds et que son coefficient de dilatation lui permette de s'allonger et de se contracter synchroniquement avec la plaque correspondante pour éviter les fuites. Ce métal doit être suffisamment doux pour que les filets de plaques en cuivre ne soient pas détériorés par le rivetage.

En terminant, nous donnerons les résultats de quelques expériences faites sur des alliages spéciaux, dits bronzes à haute résistance, et qui sont pour la plupart des laitons spéciaux.

La Marine, pour les pièces soumises au contact de la vapeur de ses machines à haute pression, procède à des essais de résistance à 15° et 215°.

Les barrettes doivent donner en moyenne :

TEMPÉRATURES	15°	215°
Résistance à la rupture	35 kilos	25 kilos
— élastique	12 —	15 —
Allongement total	18 0/0	20 0/0

Les essais sur le Roma (alliage de M. Guillemin) ont donné les résultats suivants :

	15	100	150	200	225	250
Roma numéro 3 moulé						
Résistance en kilogrammes	40	41	39	30	28	27
Limite élastique en kilogrammes	14	18	20	22	22	20
Allongement pour 100	18	20	28	44	49	50
Roma numéro 4 laminé et recuit						
Résistance en kilogrammes	40	37	36	34	30	28
Limite élastique en kilogrammes	12	14	15	15	15	14
Allongement pour 100	32	36	55	60	60	54
Roma numéro 4 laminé et écroui						
Résistance en kilogrammes	50	45	42	40	38	35
Limite élastique en kilogrammes	28	22	22	27	30	28
Allongement pour 100	22	22	24	25	30	33

Voici quelques renseignements sur le *Bull's Metal* de Joker près Glascow comparé aux bronzes ordinaires et aux laitons[1] :

TEMPÉRATURES	MÉTAL BULL LAMINÉ						MÉTAL A CANONS		LAITON LAMINÉ 60 Cu, 40 Zn			LAITON SPÉCIAL LAMINÉ 61Cu, 38Zn, 1Sn		
	DOUX			DUR										
	R	E	A 0/0	R	E	A 0/0	R	A 0/0	R	E	A 0/0	R	E	A 0/0
15°	51,5	45,25	16,5	66,5	54,8	»	23,7	12,5	39,4	25,35	21,1	42,75	29,85	19.1
150°	42,7	35,7	12,7	»	»	12,5	22,5	10,0	»	»	»	»	»	»
205°	39,95	33,2	14,6	61,5	53,8	5,8	11,0	0,75	33,8	22,4	28,7	37,05	26,35	16,2
260°	»	»	»	52,4	45,4	7,8	11,25	Nul	31,60	22,45	27,8	37,10	29,85	13,8

1. Ces résultats proviennent de la Société qui fabrique cet alliage. Certains chiffres nous paraissent bas, notamment ceux du métal à canon.

Un autre métal, le Melloïd, inventé aussi par M. Bull, possède certaines qualités.

Lorsqu'il est laminé, sa résistance à la traction est de 45 kilogrammes environ, et cette résistance n'est pas sensiblement amoindrie à 300°. En effet, il donne encore 40 kilogrammes à cette température.

Mais ce métal ne peut résister aux frottements, et il ne doit être employé que pour les plaques de foyer, entretoises, tubes, boulons, valves, etc.

Voici un tableau des expériences faites par M. Stanger, de Londres, sur cet alliage :

BARRES EN MELLOIDE	A FROID	205°	260°	315°
Résistance en kilogrammes.....	45,4	43,3	41,1	40,2
Limite d'élasticité en kilogrammes	33,4	36,9	38,9	33,7
Allongement sur 250 millimètres.	»	5,0	5,2	7,7

La conclusion est donc bien nette : ce sont les alliages spéciaux, notamment les laitons spéciaux et le cuivre manganésé qui peuvent donner le plus de satisfaction en présence de températures un peu élevées.

CONCLUSIONS

En résumé, les alliages de cuivre autres que les bronzes, les laitons et les bronzes d'aluminium qui intéressent l'industrie sont :

1° Les alliages cuivre-manganèse renfermant moins de 7 0/0 de manganèse ; ces alliages, remarquables par leur résistance à température élevée, sont surtout utilisés comme entretoises

dans les foyers de locomotives et comme tubes. Ils renferment généralement 4 à 6 0/0 de manganèse.

Ils sont formés d'une solution Cu-Mn.

2° Les alliages cuivre-phosphore utilisés pour introduire le phosphore dans les bronzes, les laitons, etc... L'industrie livre principalement deux sortes de phosphures de cuivre :

L'un, à 10 0/0 environ de phosphore : il est formé des cristaux PCu^3 entourés d'eutectique Cu-PCu^3 en quantités assez abondantes ;

L'autre, à 15 0/0 environ de phosphore : il correspond sensiblement à la combinaison PCu^3.

Or, les fondeurs emploient de préférence le phosphure à environ 10 0/0. Ils ont remarqué qu'il est beaucoup moins fragile que celui à 15 0/0, lequel est très brisant et donne, par conséquent, des pertes abondantes dans les manipulations.

Ceci s'explique très bien par la constitution de ces produits.

Celui qui correspond à la combinaison doit être beaucoup plus fragile que celui qui renferme de l'eutectique, lequel forme joint autour des cristaux de cette combinaison.

3° Les alliages cuivre-silicium, qui, d'une part, sont utilisés pour introduire le silicium dans certains bronzes et alliages de cuivre, voire même dans le cuivre pur et, d'autre part, sont employés avec une très faible teneur en silicium pour certains usages assez restreints.

Les alliages les plus utilisés pour introduire le silicium, sont ceux qui renferment 15, 20 et même 50 0/0 de silicium.

4° Les alliages de cuivre-vanadium n'ont pas encore été assez étudiés, tant au point de vue industriel qu'au point de vue théorique.

5° Les alliages de cuivre et de chrome, de cuivre et de tungstène ne paraissent pas offrir un grand intérêt; le chrome et le tungstène y sont complètement séparés.

Quant aux alliages de cuivre et d'antimoine, de cuivre et de bismuth, de cuivre et de plomb et de cuivre et d'arsenic, ils n'offrent aucun caractère industriel.

Tous ces alliages de cuivre et d'antimoine sont fragiles : les

uns parce qu'ils renferment de l'antimoine libre, les autres de par la ou les combinaisons qu'ils renferment; ceux très riches en cuivre par la solution cuivre-antimoine qui semble exister.

Les alliages de cuivre et de plomb sont très difficiles à obtenir sains et homogènes, même lorsque le plomb est en faible quantité.

Les alliages de cuivre et de bismuth sont fragiles, même ceux à très hautes teneurs en cuivre : la solution cuivre-bismuth qui se forme alors est elle-même fragile.

Il en est de même, et pour des raisons identiques des alliages cuivre-arsenic à faibles teneurs en arsenic.

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE XII

Abel, *Journal of the Chemical Society*, t. XIV, p. 183 (*Phosphures de cuivre*).

Aspinall, *Institution of mechanical Engineers Proceedings*, 1893, p. 102 (*Résistance des alliages à haute température*).

Baykoff, *Bulletin de la Société d'Encouragement*, p. 658, 1903 (*Cuivre et antimoine*).

Charpy, *Contribution à l'étude des alliages métalliques*, p. 135 (*Id.*); — *Bulletin de la Société d'Encouragement*, février 1899 (*Résistance des alliages à température élevée*).

Deville et Caron, *Annales de Chimie et de physique*, t. LXXVII, p. 441 (*Cuivre et silicium*).

Giraud, *Revue de Métallurgie*, avril 1905 (*Cuivre et oxygène*).

Heyn, *Congrès des Méthodes d'Essais*, Budapest, 1901 (*Cuivre et Oxygène*).

Hiorns, *les Alliages métalliques* (traduction Boudouard), Steinheil, 1900, p. 208 (*Cuivre et manganèse*); — *Electro-Chemist and Metallurgist*, 1904 (*Cuivre et arsenic*); — *Revue de Métallurgie* (extraits), juillet 1904 (*Id.*).

Kamensky, *Philosophical Magazine*, t. XVII, p. 270, 1884 (*Cuivre et antimoine*).

Le Chatelier (A.), *Génie civil*, 1891 (*Résistance des alliages à température élevee*; — *Revue générale des Sciences*, 1891 (*Id.*); — *Congrès de méthodes d'essais*, Paris, 1900 (*Id.*).

Le Chatelier (H.), *Contribution à l'étude des alliages métalliques* (*Société d'Encouragement*, p. 441).

Le Blant, *Congrès des Méthodes d'essais*, Paris, 1900 (*Résistance des alliages à température élevée*).

Landgrebe, *Schweigger's Journal*, 411-464 (*Phosphures de cuivre*).

Lewis, *Journal of Chemical Industry*, 28 mai 1902 (*Cuivre et manganèse*).

Nicolardot, *le Vanadium* (Collection Léauté) (*Cuivre et vanadium*).

Roland Gosselin, *Mémoire* de M. Gautier : *Contribution à l'étude des alliages métalliques* (*Cuivre, plomb, bismuth*).

Rose, *Poggendorff's Annalen*, t. IV, p. 110; t. VI, p. 209 ; —t. XV, p. 188; t. XIV, p. 328 (*Phosphures de cuivre*).

Stead, *Journal of Chemical Industry*, janvier 1899 (*Cuivre et antimoine*).

Vigouroux, Thèse de doctorat, Gauthier-Villars (*Cuivre et silicium*).

Webbs, *Institution of civil Engineers*, 1903 (*Résistance des alliages à haute température*) ; — *Revue de Métallurgie* (extraits), mai 1904 (*Id.*).

CHAPITRE XIII

ALLIAGES D'ÉTAIN

Les principaux alliages industriels d'étain sont :

Les alliages étain-cuivre déjà étudiés au chapitre VI consacré aux bronzes ordinaires;

Les alliages étain-zinc;

Les alliages étain-plomb;

Les alliages étain-cadmium;

Les alliages étain-antimoine;

Les alliages étain-bismuth;

Et certains alliages plus complexes, notamment :

Les alliages étain-zinc-plomb;

Les alliages étain-plomb-bismuth.

ALLIAGES D'ÉTAIN ET DE ZINC

Étude théorique. — COURBE DE FUSIBILITÉ. — La courbe de fusibilité des alliages étain-zinc a été déterminée par Rudberg (*Poggendorff's Annalen*, 18-240). Elle est reproduite dans la figure 187.

On y trouve un eutectique fondant à la température de 204° et correspondant à 8 0/0 de zinc. D'après cette courbe,

le zinc et l'étain ne doivent pas donner de combinaison définie.

Métallographie (Album, Pl. LXXIX, Phot. 313 et 314). — Les alliages contenant moins de 8 0/0 de zinc sont formés d'étain entouré de l'eutectique étain - zinc ; ceux renfermant plus de pour 100 de zinc sont constitués par du zinc entouré du même eutectique.

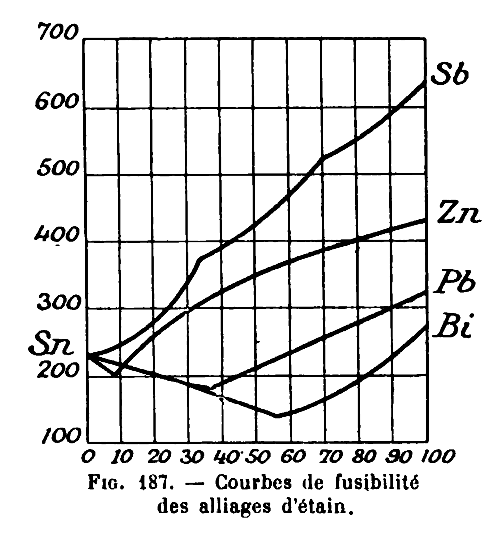


Fig. 187. — Courbes de fusibilité des alliages d'étain.

Résistance électrique. — Des déterminations ont été faites sur la résistance électrique des alliages étain-zinc par Matthiessen. Il a montré que la variation de la résistance se faisait suivant une ligne droite joignant la valeur de la conductibilité des deux métaux initiaux.

Force électromotrice de dissolution. — M. Herschkowitsch a montré que la détermination de la force électromotrice de dissolution ne mettait en vue aucune combinaison étain-zinc.

Étude industrielle. — Fabrication. — Les alliages que nous allons étudier maintenant ne présentent généralement aucune particularité au point de vue de leur fabrication. C'est dire qu'ils s'obtiennent en fondant le métal à point de fusion le plus élevé, en y ajoutant les autres métaux par ordre de points de fusion, en finissant par celui qui fond à la plus basse température. Nous ne parlerons donc désormais de la fabrication proprement dite que lorsqu'elle présentera quelque intérêt spécial.

Propriétés. — Guettier (*Guide pratique des alliages*) a défini de la façon suivante les propriétés des alliages étain-zinc.

N° 1 : *Étain*, 30; *zinc*, 70. — Texture d'un blanc terne. — Tassement moyen. — Casse aisément. — Cassure à larges facettes plus brillantes que celles du zinc. — Le métal du fond du moule est plus dense. — Sec à limer. — Prend à la lime un poli bleuâtre. — Éclate sous le burin. — Sonne peu. — Traces de cristallisation à surface coulée, avec une faible couleur jaune.

N° 2 : *Étain*, 25; *zinc*, 75. — Texture d'un blanc tirant sur le bleu. — Tassement faible. — Cassure brillante avec de larges facettes bleuâtres comme celles du zinc. — L'étain dans le culot paraît comme au numéro 1, en plus forte dose au fond du moule. — La surface coulée est plutôt couverte d'une peau ridée que cristallisée avec les tons de l'iris, bleu clair, violâtre et jaune d'or.

N° 3 : *Étain*, 50; *zinc*, 50. — Texture d'un blanc pâle. — La surface coulée du culot est très unie, à la fois grenue et un peu lamelleuse sans aucune apparence de tassement; les bords légèrement arrondis et avec les couleurs d'iris peu indiquées. — Le grain à la cassure est brillant: à petites facettes, à fond blanc d'étain. — Un peu gras à la lime, bien mêlé, nerveux et malléable sans être mou.

N° 4 : *Étain*, 70; *zinc*, 30. — Texture blanche un peu brillante. — Pas de tassement. — Sonne peu. — La surface à la coulée est grenue avec couleur d'un blanc mat mêlé de quelques tons d'un jaune clair. — Casse très difficilement. — Se martelle bien. — Se burine aisément; est gras à la lime. — La cassure est comme celle de l'étain, sans cristallisation et sans brillant. — Le poli a un peu d'éclat, quoique plus terne que celui de l'étain. — L'alliage est plus complet et mieux mélangé que les précédents.

N° 5 : *Étain*, 75; *zinc*, 25. — Texture d'un blanc d'étain mais sans brillant. — Pas de tassement. — Surface grenue à la coulée et comme saupoudrée de parcelles brillantes. La surface supérieure présente un ton changeant du jaune au bleu rougeâtre. — Plus gras à limer que le numéro 4. — Très malléable, mais plus résistant au marteau et plus difficile à

enlever au burin que le numéro 4. — Plie sans reproduire le craquement de l'étain.

N° 6 : *Étain*, 10; *zinc*, 90. — Le barreau présente à la cassure les caractères du barreau de zinc. — Il est un peu plus gras à limer, et sa cassure après la lime est d'un gris moins terne. — Le fond du culot est d'un métal mou prenant facilement l'empreinte du poinçon. — Comme au numéro 2, l'étain paraît s'être précipité et la partie du fond est même plus molle que l'étain pur.

N° 7 : *Étain*, 90; *zinc*, 10. — Le barreau présente un arrachement pareil à celui de l'étain. — Il a fallu couper entièrement la coulée pour le détacher. — L'alliage est moins gras à limer que l'étain pur. — Le culot a éprouvé un tassement notable au milieu, tout en conservant ses bords à angles vifs. — L'alliage est très malléable, bien qu'il ne soit pas mou sous le marteau.

N° 8 : *Étain*, 1; *zinc*, 99. — La cassure est pareille à celle du zinc; mais les facettes sont un peu moins larges. — L'éclat après la lime est un peu plus brillant. — La coulée du barreau a subi au milieu un tassement important. Le culot également est tassé au milieu et sa partie intérieure est molle comme au numéro 6, mais sur une épaisseur moins forte, en raison du peu d'étain introduit dans l'alliage. — La partie molle est bleuâtre à la manière du plomb et se raye facilement avec l'ongle.

N° 9 : *Étain*, 99; *zinc*, 1. — La cassure est légèrement grenue, moins terne et moins arrachée que celle de l'étain. — L'éclat au poli est aussi moins brillant. — Le tassement, assez prononcé à la coulée du barreau, n'est pas sensible au culot, dont la surface reproduit des couleurs iris un peu foncées.

Observations générales. — Les alliages où la proportion du zinc est la plus forte cristallisent en larges facettes brillantes.

Une très petite partie d'étain ajoutée au zinc détermine cette cristallisation. Dans les mêmes circonstances, les parties extérieures des pièces coulées se recouvrent d'un moiré blanc jaune très sensible.

Dans les pièces massives, où le zinc domine, l'alliage tend à se précipiter sur le fond du moule. — Et, chose remarquable, cette tendance augmente en raison directe du peu d'étain introduit dans l'alliage, de telle sorte que la séparation est plus sensible dans le numéro 8 que dans le numéro 6. — On peut citer aussi comme anomalie singulière ce fait que l'étain qui a passé dans le zinc et s'est précipité perd les qualités qui le distinguent, devient de couleur terne et bleuâtre comme le plomb et aussi mou que ce métal[1].

La couleur du zinc, soit brut, soit limé, acquiert un brillant plus vif en raison directe de la dose d'étain introduite dans l'alliage.

Les alliages forcés en étain prennent du grain quand on augmente la quantité du zinc.

L'alliage n° 3 (Sn = 50, Zn = 50) a, sauf la couleur plus pâle et plus terne, la cassure du fer.

Un alliage formé de :

Sn	99
Zn	1

n'offre déjà plus à la rupture la surface arrachée de l'étain ; la cassure est d'un gris terne, à grains fins.

La densité des alliages étain-zinc est proportionnelle à la densité moyenne de ces deux métaux ; les alliages forts en étain sont par conséquent les plus lourds.

Le déchet se fait sentir davantage sur les alliages forcés en zinc. — L'étain n'ayant été chargé au creuset qu'après le zinc fondu, il faut attribuer de préférence l'excédent du déchet à la volatilisation du zinc.

L'alliage de 1 0/0 de zinc à l'étain rend celui-ci moins flexible et suffit pour lui enlever le cri qui lui est particulier. Ces deux alliages, quand la combinaison est intime, s'opèrent très bien, sans autre altération sensible.

Le terme à choisir comme roideur et comme économie est

1. L'étain doit entraîner un peu de zinc. Tous ces essais mériteraient d'être repris, avec une précision scientifique plus grande.

l'alliage 50 étain, 50 zinc. — Plus de zinc donne un alliage moins mêlé, plus cristallisant et plus cassant. — Plus d'étain, un métal trop gras, trop flexible. — Cependant, pour des pièces minces et de résistance, l'alliage 70 étain, 30 zinc, est très convenable. Les alliages placés entre celui-ci et la proportion 50 sur 50 sont très résistants et tenaces. Ils augmentent de malléabilité suivant qu'est augmentée la dose d'étain.

L'alliage de 1 zinc à 99 étain, sans ôter de la malléabilité à l'étain, rend ce métal plus dur, moins flexible et plus tenace pour les pièces coulées.

Les alliages en proportion maxima de zinc ne peuvent être utiles en fonderie que pour des objets massifs; ils deviennent alors d'une grande économie. Jusqu'à la proportion 30 étain, 70 zinc, ils demeurent presque aussi cassants que le zinc. La proportion 25 étain, 75 zinc, qui donne un alliage moins flexible que l'étain et moins cassant que le zinc, pourrait fournir les meilleures bases pour les modèles à faire dans les fonderies.

Les alliages n°s 6 et 8 ont paru plus cassants que le zinc dans les épreuves où l'étain, traversant le moule, s'est précipité au fond. On pourrait en inférer qu'une quantité sensiblement inférieure à 1 0/0 d'étain suffirait pour altérer la nature du zinc.

La proportion 40 étain, 60 zinc, deviendrait un peu malléable.

Utilisation. — Les alliages étain-zinc sont rarement employés comme métaux blancs.

On les utilise, en fonderie, pour préparer des modèles métalliques. A ce sujet, Guettier conseille l'alliage :

Sn	50
Zn	50

Enfin, il est bon de rappeler que l'on lamine souvent une très faible lame d'étain sur les deux côtés d'une feuille épaisse de zinc. On obtient ainsi un métal très utilisé actuellement dans la confection des boutons.

ALLIAGES D'ÉTAIN ET DE PLOMB

Étude théorique. — Courbe de fusibilité. — Cette courbe déterminée par Kupffer (*Annales de Chimie et Physique*, XL, 289) indique un eutectique fondant à la température de 182° et correspondant à 37 0/0 de plomb (*fig.* 187).

Métallographie (Album, Pl. LXXIX, Phot. 315 et 316). — D'après la courbe de fusibilité, le plomb et l'étain ne donnent naissance à aucune combinaison. Les alliages renfermant moins de 37 0/0 de plomb sont formés de cristaux d'étain enchâssés dans l'eutectique étain-plomb; pour une teneur supérieure à 37 0/0, on a des cristaux de plomb enchâssés dans le même eutectique.

M. Charpy a étudié ces alliages : le polissage ne met pas en évidence la texture; l'acide chlorhydrique dissout l'étain et recouvre le plomb d'une croûte blanche de chlorure; l'acide azotique dissout le plomb et produit de l'acide métastannique blanc qui recouvre l'étain. Ces deux attaques produisent des figures inverses.

Nous donnons dans l'*Atlas* quelques micrographies de ces alliages. Le photogramme 315 représente un alliage à 85 0/0 d'étain formé de cristallites d'étain entourées d'eutectique; la micrographie 316 donne l'eutectique (étain, 63 0/0).

Force électromotrice. — D'après Laurie, la force électromotrice des alliages étain-plomb est constante.

Résistance électrique. — Comme pour les alliages étain-zinc, Matthiessen a trouvé une ligne droite pour la conductibilité des alliages étain-plomb.

Étude industrielle. — Propriétés. — Guettier, dans le livre déjà cité, donne les propriétés de quelques-uns de ces alliages[1] :

1. Nous ferons pour ces données la même réflexion que sur les essais analogues du même auteur sur les alliages étain-zinc : bien que donnant de nombreux renseignements intéressants, ils mériteraient d'être repris avec une méthode plus scientifique et plus moderne.

N° 1 : *Étain*, 75; *plomb*, 25. — Cassure d'un blanc gris, se séparant à l'aide du marteau avec arrachement beaucoup moins prononcé que l'étain pur. — Plus sec que ce dernier métal. — Plus gras à limer que l'étain et moins que le plomb. — Moins flexible et plus malléable que l'étain. — Assez ductile. — Point de tassement au culot et très peu au jet du barreau. — Éclat après la lime, un peu plus terne que celui de l'étain. Le barreau ne raye pas le papier.

N° 2 : *Étain*, 25; *plomb*, 75. — Arrachement plus prononcé que celui du numéro 1; c'est bien plus un arrachement qu'une cassure. — Cet arrachement présente le caractère de celui du plomb, quoique d'un blanc plus brillant. — Malléable. — Très facile à allonger au marteau, comme le plomb. — Gras à limer, mais ne collant pas à la lime autant que le plomb. — Raye le papier d'une façon très prononcée. — Tassement fouillé assez notable au jet du barreau et insensible au culot. — Les surfaces limées sont d'un poli terne.

N° 3 : *Étain*, 50; *plomb*, 50. — Cassure assez facile au marteau après un trait de scie de $0^m,001$ de profondeur autour du barreau, plus sèche et plus facile à déterminer qu'au numéro 1. — Un peu moins dur à marteler, cependant bien malléable, ductile et résistant autant que l'étain. — Moins brillant que celui-ci après la lime, plus glissant et aussi dur à limer. — Faible tassement et couleur à la manière de l'étain au culot et à la coulée du barreau. Le barreau raye facilement le papier.

N° 4 : *Étain*, 90; *plomb*, 10. — Cassure avec peu d'arrachement, pareille à celle du numéro 1. — Après un trait de scie comme au numéro 3, le barreau a fléchi légèrement quand on a enlevé le jet au marteau. — Le poli à la lime reste à très peu près celui de l'étain. Le jet présente un tassement à peine prononcé; le culot n'en a pas. — L'alliage est un peu plus gras à limer que l'étain, un peu plus mou, mais ayant à la texture de nombreux rapprochements avec ce métal. — Ne raye pas le papier.

N° 5 : *Étain*, 10; *plomb*, 90. — Cassure d'un blanc gris avec arrachements prononcés comme au numéro 2. — Mou comme

ce numéro, mais cependant beaucoup moins mou que le plomb pur. — Raye le papier presque autant que le plomb pur. — Gras à limer, empâte la lime. — Plus roide et moins flexible que le plomb. — Se raye sous l'ongle, comme le numéro 2. — Les numéros 1 et 4 ne se rayent pas; le numéro 3, un peu.

Observations générales. — Les alliages étain-plomb s'obtiennent facilement. — Ils donnent, en général, plus de résistance au plomb, et ils n'altèrent pas sensiblement les qualités de l'étain. — On reconnaîtrait, pour ainsi dire, la dose de plomb contenu dans l'alliage à la manière dont celui-ci se coupe au ciseau, s'enfonce sous le poinçon et raye le papier.

Le numéro 4 (étain, 90; plomb, 10) ne raye pas le papier. Le numéro 1 (étain, 75; plomb, 25) ne le raye que peu. Entre ces deux limites, vers 85 étain et 15 plomb, toute trace du plomb sur le papier disparaît, et l'alliage peut donner cet indice suffisant en pratique pour faire reconnaître jusqu'à ces proportions la présence du plomb.

Les alliages de plomb et d'étain ont moins de tassement que ces deux métaux pris séparément; ils sont un peu moins coulants, et ils donnent des surfaces plus molles aux pièces coulées.

Le plomb, joint à l'étain, augmente sa malléabilité, sa ductilité, mais il diminue sa ténacité. — Difficile à rompre, même après l'avoir replié plusieurs fois sur lui-même, l'étain devient plus cassant mêlé au plomb et présente même une cassure plus caractérisée, quel que soit l'alliage, que ce dernier métal, qui se sépare plus aisément que l'étain, mais qui ne se sépare toutefois que par arrachement.

Dans l'alliage numéro 4 (90 étain, 10 plomb) l'étain conserve son cri, peut-être à un degré moins élevé qu'à l'état de pureté, mais assez pour induire en erreur les consommateurs peu exercés. Cette qualité de l'alliage numéro 4, qui a d'ailleurs bien d'autres rapports avec l'étain pur, explique les falsifications qu'on rencontre quelquefois dans les étains du commerce. L'essai sur le papier est favorable, comme celui du cri, à la falsification que permet l'alliage numéro 4. — A partir des proportions de cet alliage, il devient très difficile, si l'on n'a pas une grande pra-

tique, de reconnaître instantanément la présence du plomb dans l'étain.

Dans les alliages zinc-étain, au contraire, la présence de 1 0/0 de zinc suffit pour annuler cette propriété qu'on appelle cri de l'étain. Cette circonstance, à elle seule, peut permettre de reconnaître l'alliage qu'assez d'autres signes particuliers désignés précédemment font distinguer de l'étain pur.

L'alliage numéro 1 (75 étain, 25 plomb) ne crie pas quand il est plié. En le courbant à angle droit, il commence à montrer une déchirure assez prononcée qui s'ouvre encore davantage quand on redresse le barreau. — Un pareil signe ne se produit pas lorsque l'étain pur est plié une première fois; il est même insensible dans l'alliage numéro 4, bien que celui-ci soit plus cassant et ne présente pas un arrachement comme l'étain.

Ce serait surtout à cette cassure qu'on pourrait distinguer l'alliage numéro 4 de l'étain pur. Ajoutons que le cri est un peu moins fort, la trace laissée sur papier un peu plus sensible, la texture un peu plus sombre, le poli un peu moins brillant: ce sont des moyens de ne pas s'y laisser tromper. Mais tous ces indices sont si peu perceptibles qu'il faut toute leur réunion et, de plus, comme nous l'avons dit, un œil bien exercé pour les apprécier.

Au-dessous des proportions du numéro 4, ces nuances sont encore moins sensibles, et plus la dose en plomb diminue, plus il devient difficile de reconnaître la présence du plomb. Aussi arrive-t-il qu'on trouve dans le commerce peu d'étains, même ceux dits les plus purs, qui ne contiennent du plomb.

La texture de l'alliage sur les parties coulées à l'air est encore un moyen de reconnaître la présence de ce métal. Dans les alliages où le plomb est représenté sensiblement, la texture est moins cristallisée; elle est couverte d'une pellicule plus grenue ou plus ridée; elle présente moins les reflets de l'iris; elle a, en un mot, un éclat plus sombre, plus métallique. A côté de ces données toutes pratiques, et sans avoir recours aux analyses, le consommateur a encore d'autres moyens de distinguer les alliages plomb et étain. Ces moyens dérivent,

comme ceux que nous avons esquissés de la constitution même des alliages. On peut, par exemple, juger ceux-ci par leur densité, qui s'établit proportionnellement sur la densité moyenne des deux métaux alliés.

Un alliage étain-plomb au-dessus de 70 0/0 de plomb commence à manquer de soudabilité. Les alliages à soudure se limitent, pour les soudures de gros travaux, à 30 étain et 70 plomb; pour les soudures douces à 70 étain et 30 plomb; de telle sorte que, dans ces alliages, il n'y a jamais moins de 30 0/0 de celui des composants mis à la dose la plus faible.

Utilisations. — Les principaux emplois des alliages étain-plomb sont :

A. Les potins ;

B. La joaillerie très commune ;

C. La fabrication d'objets de Paris, de jouets, etc. ;

D. La préparation de soudures tendres.

A. *Potins*. — Les teneurs en plomb des potins varient beaucoup; le type le plus répandu est :

Sn	82
Pb	18

On a signalé des potins renfermant :

Sn	50
Pb	50

La loi française n'admet pas une teneur en plomb supérieure à 18 0/0 pour tous les appareils de mesure servant pour le vin, le vinaigre, etc.

Cette limite est adoptée à cause du danger d'intoxication que présentent les alliages renfermant trop de plomb. Aussi remplace-t-on de plus en plus le potin par l'étain pur, ou, du moins par l'étain renfermant de très faibles quantités de plomb.

B. *Alliages pour joaillerie très commune.* — La joaillerie emploie pour les bijoux les plus communs des alliages plomb-étain dont le type le plus répandu est :

Sn	60
Pb	40

Généralement cet alliage est coulé dans des moules métalliques de formes spéciales, qui préparent des facettes. Il ne reste plus qu'à polir et à parfaire les surfaces planes.

C. *Alliages pour objets de Paris, jouets, etc.* — Les alliages plomb-étain sont très employés pour la confection des jouets et de certains objets de Paris.

Les *soldats de plomb* et tous les jouets similaires sont généralement préparés avec des alliages étain-plomb, dont le type le plus courant est :

Sn	4
Pb	96

Le même alliage est parfois utilisé pour les tuyaux d'orgue.

D. *Alliages pour soudures tendres.* — Si l'on se reporte à la courbe de fusibilité que nous avons donnée plus haut, on voit que l'alliage fondant le plus bas (eutectique) est celui renfermant 63 0/0 d'étain et 37 0/0 de plomb. Cet alliage est peu usité comme soudure.

La *soudure des ferblantiers* est l'alliage

Sn	45
Pb	55

Celle des *zingueurs* correspond à

Sn	40
Pb	60

La différence entre les deux soudures se trouve surtout dans la différence de prix qui provient de la teneur en plomb.

On emploie pour souder le bronze siliceux :

Sn	66
Pb	34

On utilise aussi d'autres alliages. Les plus courants sont les suivants :

Sn	10
Pb	90
Sn	17
Pb	83
Sn	25
Pb	75
Sn	50
Pb	50
Sn	60
Pb	40
Sn	75
Pb	25
Sn	80
Pb	20
Sn	83
Pb	17

Ces dernières soudures ne sont utilisées que pour souder les vaisselles d'étain ou les objets de quelque valeur.

ALLIAGES D'ÉTAIN ET DE CADMIUM

Étude théorique. — COURBE DE FUSIBILITÉ. — Nous avons déterminé la courbe de fusibilité des alliages étain-cadmium que nous n'avons rencontrée dans aucun mémoire.

Les résultats que nous avons trouvés sont les suivants :

TENEUR EN ÉTAIN DES ALLIAGES	POINTS DE FUSION
90,3	185
82,1	170
69,7	155
60,3	150
49,6	145
40,0	150
29,7	172
21,3	190
9,8	240

En somme, la courbe est formée de deux branches avec un eutectique à environ 50 0/0 (*fig.* 188).

Métallographie (Album, Pl. LXXX, Phot. 317 et 318). — La

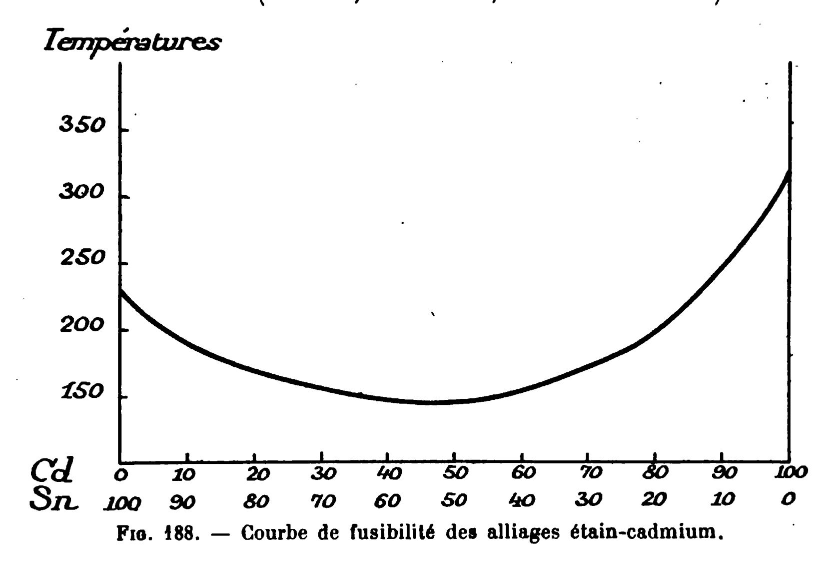


Fig. 188. — Courbe de fusibilité des alliages étain-cadmium.

micrographie confirme les résultats donnés par la courbe de fusibilité : les alliages contenant moins de 50 0/0 de cadmium sont formés d'étain entouré de l'eutectique; ceux renfermant plus de 50 0/0 de cadmium sont constitués par du cadmium entouré d'eutectique.

Résistance électrique. — Des expériences de Matthiessen, il résulte que la courbe de conductibilité de ces alliages est une droite.

Force électromotrice de dissolution. — Laurie a montré qu'elle était sensiblement constante.

Étude industrielle. — Les alliages étain-cadmium ne sont pas utilisés dans l'industrie.

Ils ne présentent aucune propriété particulièrement intéressante, étant donné surtout le prix de ce dernier métal.

ALLIAGES D'ÉTAIN ET D'ANTIMOINE

Étude théorique. — Courbe de fusibilité et points de transformation. — Cette courbe, déterminée par M. Roland Gosselin, se compose de trois arcs dont la concavité se tourne vers l'axe des y et qui se coupent en deux points. Ceux-ci correspondent à 33 et 70 0/0 d'antimoine et ont comme points de fusion 375° et 520° (*fig.* 187).

M. Reinders vient de reprendre (*Proc. mechanical Engineers*, 1904) l'étude des alliages étain-antimoine. Il en a déterminé la courbe de fusibilité, qui diffère de celle de M. Roland-Gosselin ; nous la donnons dans la figure 189.

De plus, il a observé pendant le refroidissement de nombreux points de transformation.

Quand on ajoute des quantités croissantes d'antimoine à l'étain, le point de solidification commence à s'élever de suite, sans passer par un eutectique. Il y a donc formation d'une solution solide étain-antimoine. Il en est ainsi jusqu'à 8 0/0 d'antimoine. A partir de ce point C, la courbe de fusibilité s'élève plus rapidement. Pour des alliages contenant plus de 20 0/0 d'antimoine, à partir du point D, on observe trois points d'arrêt du thermomètre. A partir de la teneur de 50 0/0, on a une nouvelle branche de courbe.

Métallographie (Album, Pl. LXXX, Phot. 319 et 320; Pl. LXXXI, Phot. 321 et 322). — L'étude micrographique des alliages étain-antimoine a été faite par M. Charpy (*Contribution à l'étude des alliages*, Société d'Encouragement, p. 144).

Dans les alliages très riches en étain, on obtient, par une attaque à l'acide chlorhydrique étendu, des aiguilles d'étain cristallisé englobées dans un eutectique. Ceci semble en contradiction avec les recherches récentes de M. Reinders, qui croit à la formation d'une solution solide, laquelle peut, il est vrai, abandonner des cristaux d'étain par refroidissement.

A partir de 10 0/0 d'antimoine, on trouve, après simple polissage, des cristaux cubiques extrêmement blancs; quand on attaque à l'acide chlorhydrique, on met en vue l'eutectique. Plus la proportion d'antimoine augmente, plus les cristaux deviennent importants.

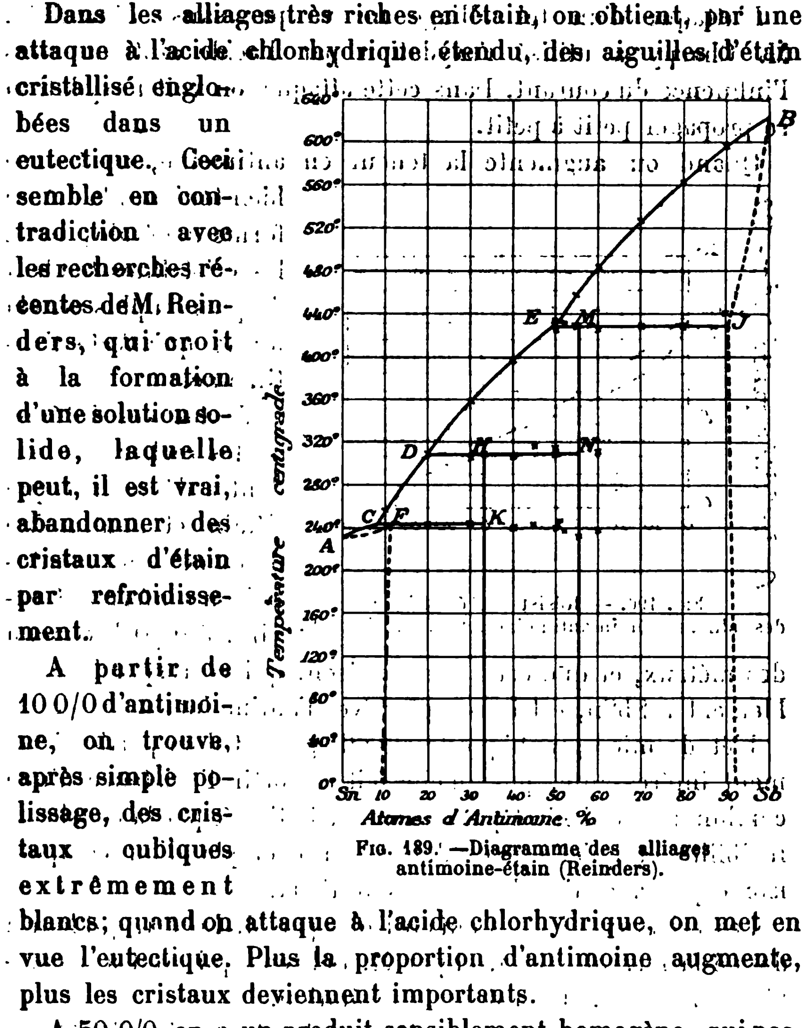


Fig. 189. — Diagramme des alliages antimoine-étain (Reinders).

A 50 0/0, on a un produit sensiblement homogène, qui possède de nombreuses criques; l'attaque n'a aucun effet, si ce n'est d'accentuer ces criques. On se trouve donc très probablement en présence d'un composé défini.

Au-delà de 50 0/0, vers 60 0/0, on obtient des aiguilles dures qui ne sont pas des cristaux isolés, mais qui forment seulement des arêtes d'éléments très développés; on les aperçoit d'ailleurs difficilement.

L'attaque d'un tel alliage ne va pas sans difficultés. M. Charpy a utilisé l'oxydation par l'acide azotique sous l'influence du courant. Dans cette attaque, on voit l'oxydation se propager petit à petit.

Quand on augmente la teneur en antimoine, on trouve bien toujours la même forme générale; mais les cristallites tendent de plus en plus vers la forme qu'affecte l'antimoine.

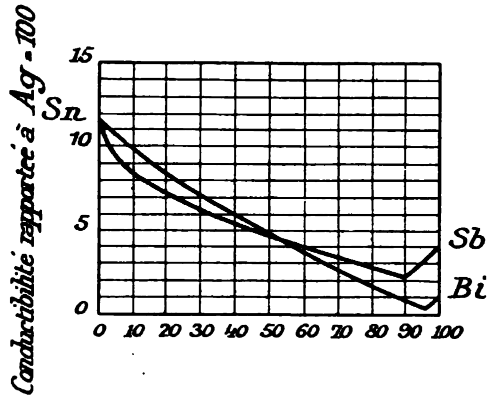


FIG. 190. — Résistance électrique des alliages étain-antimoine et étain-bismuth.

Toutes ces intéressantes recherches tendent à démontrer que l'étain et l'antimoine donnent une combinaison renfermant environ 50 0/0 de chacun des métaux, et que cette combinaison, qui correspond sensiblement à SbSn, est isomorphe avec l'antimoine.

L'étude micrographique de ces alliages est donc particulièrement intéressante, puisqu'elle fait ressortir l'existence d'une combinaison qui n'est pas nettement indiquée par la courbe de fusibilité et qu'elle nous donne un exemple d'un composé isomorphe avec l'un des métaux initiaux.

Les cristaux cubiques ont été isolés par M. Locart, qui leur a donné la formule SbSn, et par M. Behrens, qui croit à la combinaison $SbSn^2$. Il y a donc là hésitation.

Résistance électrique. — La courbe de conductibilité des alliages étain-antimoine a été tracée par Matthiessen; elle présente un minimum pour environ 90 0/0 d'étain.

On sait (*Étude théorique des alliages métalliques*, chap. xx) que l'on ne peut tirer aucune conclusion de ce minimum.

Force électromotrice de dissolution. — D'après Laurie, la force électromotrice de dissolution de ces alliages serait sensiblement constante.

Étude industrielle. — Fabrication. — Au lieu de fondre ensemble les deux métaux, on a cherché à opérer la réduction du sulfure d'antimoine en contact avec l'étain.

Cette méthode peu scientifique et peu pratique n'est plus usitée.

Propriétés. — L'antimoine durcit considérablement l'étain et, si on l'ajoute en quantités assez importantes, l'alliage devient même brisant.

Jusqu'à 20 0/0 d'antimoine, l'alliage garde une grande malléabilité.

Il peut être laminé et forgé à froid.

L'industrie utilise parfois des alliages un peu plus riches jusqu'à 33 0/0, qui sont très durs et fragiles.

Utilisations. — Les usages des alliages étain-antimoine sont:

A. La fabrication des poteries d'étain;

B. La fabrication du métal anglais *Britannia Metal* et des alliages similaires;

C. La préparation de coussinets pour machines (antifriction);

D. La fabrication de certains objets moulés, notamment de robinets;

E. La préparation des planches servant à la gravure.

A. *Alliages utilisés dans la fabrication des poteries d'étain.* — Ces alliages sont tous voisins du type :

Sn	80
Sb	20

Rappelons que cet alliage se lamine et se martèle fort bien.

B. *Alliages connus sous le nom de métal anglais.* — Le métal anglais type est formé de :

Sn	91
Sb	9

Cependant on s'éloigne assez souvent de cette composition; c'est ainsi que l'on utilise fréquemment l'alliage

Sn	94
Sb	6

Il est rare, d'ailleurs, que le métal anglais actuellement employé ne soit formé que d'étain et d'antimoine; on ajoute souvent à ces métaux du plomb, du zinc, du cuivre, ou même du bismuth, du nickel, etc... Mais il faut bien reconnaître que ces alliages complexes ont moins de brillant que celui formé d'étain et d'antimoine seuls.

Voici, d'après Hiorns, la composition d'un certain nombre de ces alliages.

MÉTAL BRITANNIA	Sn	Sb	Cu	Zn	Bi	Pb	AUTRES MÉTAUX
Anglais........	94	5	1	»	»	»	»
—	90	6	2	»	2	»	»
—	90	7	3	»	»	»	»
—	89,3	7	1,8	»	»	1,08	»
—	85,47	9,66	1,81	3,06	»	»	»
—	85	5	3,5	1,5	5	»	»
—	80	10	9	»	»	1	»
—	75	8,5	»	»	8	8,5	»
—	90,6	7,8	1,5	»	»	»	»
—	90,6	0,2	9,2	»	»	»	»
Métal de la Reine...	50,5 à 75,5	16,5 à 8,5	»	»	16,5 à 8	16,5 à 8	»
—	88,5	7,1	3,5	0,9	»	»	»
— ...	88,5	7,0	3,5	»	1	»	laiton?
Métal anglais Tutania..............	25	25	»	»	25	»	25
Métal allemand Tutania..............	7	92	1	»	»	»	»
Métal Engestrum Tutania............	7	62	31	»	»	»	»
Métal Biddery (Inde).	»	»	3,5	93,4	»	3,1	»
— —	1,4	»	11,4	84,3	»	2,9	nickel
— Ashberry......	80	14	2	1	»	»	3
— —	79	15	3	2	»	»	1
— Minofor......	68,5	18,2	3,3	10	»	»	»
— Allemand......	72	24	4	»	»	»	»
— —	84	9	2	5	»	»	»
— —	20	69	10	6	»	»	»

Le même auteur cite un autre alliage plus complexe encore formé de :

Sn	87
Cu	2
Laiton (70 Cu, 30 Zn)	1
Ni	2
Bi	0,5
Sb	6
W	1,5 ??

L'emploi du laiton doit avoir pour but d'introduire le zinc sans avoir à craindre de volatilisation. L'auteur ne dit pas comment se fait l'introduction du tungstène.

Le métal anglais (ou métal Britannia) est généralement coulé dans des moules en laiton enduits d'un corps gras et chauffés légèrement.

Il nous serait impossible de citer ici tous les objets préparés en métal anglais, objets de table (cuillers, cafetières, etc.), objets de toilette, d'ornementation, etc.

C. Alliages pour coussinets de machines. — Nous consacrons plus loin un chapitre (Voir p. 865) aux alliages dits antifrictions. Nous y discuterons les valeurs des diverses compositions adoptées.

Nous tenons toutefois à citer de suite l'alliage :

Sn	80
Sb	20

comme employé pour les coussinets. Nous verrons, d'ailleurs, qu'on utilise généralement des alliages plus complexes.

D. Alliages pour moulages (robinetterie). — Certains alliages d'étain et d'antimoine sont utilisés pour préparer divers objets moulés, dont la composition s'éloigne de celle du métal anglais, notamment des corps et des noix de robinets.

Voici les types de ces alliages :

1° Pour corps de robinets :

Sn	86
Sb	14

2° Pour noix de robinets :

Sn	80
Sb	20

E. ALLIAGES POUR PLANCHES DE GRAVURE. — L'alliage employé est le même métal que pour la poterie, c'est-à-dire :

Sn	80
Sb	20

ALLIAGES D'ÉTAIN ET DE BISMUTH

Étude théorique. — COURBE DE FUSIBILITÉ. — Cette courbe est absolument analogue à celle des alliages étain-zinc, étain-plomb, c'est-à-dire qu'elle est formée de deux branches qui se coupent en un point qui indique un eutectique. Ce point correspond à l'alliage renfermant 55 0/0 de bismuth et fondant à 143°.

Cette courbe, déterminée par Rudberg (*Poggendorff's Annalen*), est reproduite dans la figure 187.

MÉTALLOGRAPHIE (Album, Pl. LXXXI, Phot. 323 et 324). — M. Charpy a étudié ces alliages par voie métallographique. Cette méthode confirme entièrement la constitution telle que la fait présumer la courbe de fusibilité.

Les alliages renfermant de 0 à 55 0/0 de bismuth sont formés de cristaux d'étain enchâssés dans l'eutectique, qui vont en diminuant au fur et à mesure que la teneur en bismuth augmente ; pour des pourcentages en bismuth supérieurs à 55 0/0, on a des cristaux de bismuth entourés du même eutectique.

Ces cristaux vont en augmentant au fur et à merure que le pourcentage du bismuth croît.

Nous donnons la micrographie de l'alliage eutectique et dun alliage à 70 0/0 d'étain. Ce dernier est formé de cristaux d'étain entourés de l'eutectique.

Force électromotrice de dissolution. — D'après Laurie, la force électromotrice des alliages étain-bismuth est indépendante de la composition.

Résistance électrique. — La courbe de conductibilité des alliages étain-bismuth est analogue à celle des alliages étain-antimoine. Elle présente un minimum pour une teneur de bismuth d'environ 50/0. Ces travaux sont dus à Matthiessen (*fig.* 190).

Étude industrielle. — Propriétés. — Le bismuth durcit considérablement l'étain, tout en lui donnant de la sonorité.

Il ne faut pas oublier que, d'une part, le bismuth est d'un prix élevé et que, d'autre part, il renferme toujours un peu d'arsenic.

Utilisations. — Les alliages de bismuth et d'étain ne sont guère employés dans l'industrie. Le seul intérêt qu'ils présentent réside dans leur fusibilité. Ceux qui sont les plus usités comme alliages fusibles sont :

Bi	Sn	POINT DE FUSION
20	80	200 degrés
33	67	166 —
45	55	145 —

ALLIAGES D'ÉTAIN ET DE PHOSPHORE

Ces alliages sont utilisés, sur une faible échelle d'ailleurs, pour introduire le phosphore dans un certain nombre d'alliages, voire même dans les bronzes. — Ils sont obtenus par une méthode analogue à celle employée pour les alliages cuivre-phosphore, qui, nous l'avons dit, sont d'un usage courant. Le commerce met en vente un alliage renfermant de 8 à 10 0/0 de

phosphore, lequel est très cassant et contient de grands cristaux d'une combinaison Sn-Ph.

ALLIAGES D'ÉTAIN PLUS COMPLEXES

ALLIAGES D'ÉTAIN, DE BISMUTH ET DE PLOMB

Ces alliages présentent un intérêt industriel par leur point de fusion peu élevé.

L'alliage qui fond le plus bas est celui qui est formé de :

Pb	25 0/0
Sn	25 0/0
Bi	50 0/0

Il est connu sous le nom d'*alliage de Darcet*.

Il fond à 94° ; il se dilate régulièrement de 32 à 95°, puis il se contracte jusqu'à 131° ; à cette température, son volume est moindre qu'à 32°. De 131 à 174°, il se dilate ; au-delà de 174°, il éprouve une dilatation normale. Ces observations sont dues à Erman.

Le fait que cet alliage se dilate pendant le refroidissement, alors qu'il n'est pas encore solidifié, permet de l'utiliser pour prendre les empreintes délicates.

Voici les observations de Darcet sur d'autres alliages Sn-Bi-Pb[1].

Bi	Pb	Sn	OBSERVATIONS
70	20	40	Se ramollit à 100 sans fondre.
80	20	60	— mais s'oxyde.
80	20	40	Se ramollit à 100.
80	20	35	— —
90	28	40	— —
80	25	35	Est presque fluide à 100°.
80	30	40	Liquide à 100° sans être très fluide.
80	40	40	Très liquide à 100°.
80	70	10	Mou à 100°

1. La composition n'est pas centésimale.

D'autre part, Parkes et Martin ont publié les résultats suivants :

BISMUTH	PLOMB	ÉTAIN	POINTS de FUSION	BISMUTH	PLOMB	ÉTAIN	POINTS de FUSION
8	5	3	94°	8	16	24	158°
8	6	3	98	8	18	24	156
8	8	3	108	8	20	24	154
8	8	4	113	8	22	24	153
8	8	6	117	8	24	24	154
8	8	8	123	8	26	24	160
8	10	8	130	8	28	24	166
8	12	8	132	8	32	24	172
8	16	8	149	8	32	24	178
8	16	10	151	8	32	28	167
8	16	12	143	8	32	30	164
8	16	14	143	8	32	32	160
8	16	16	144	8	32	34	159
8	16	18	148	8	32	36	160
8	16	20	151	8	32	38	161
8	16	22	156	8	32	40	162

Parmi les alliages fusibles il faut citer :

L'alliage de Newton :

Bi	8
Pb	5
Sn	3
Point de fusion	94°

L'alliage

Bi	5
Pb	3
Sn	2
Point de fusion	90°

Ces alliages sont employés comme bains de trempe pour les aciers. Ils donnent une trempe douce et empêchent les tapures.

On emploie souvent, pour les moulages délicats, les alliages suivants qui se dilatent par refroidissement :

Bi	Sn	Pb
6	3	13
5	2	3
2	1	1
8	3	5

On utilise aussi dans le même ordre d'idées des alliages contenant de l'antimoine. Hiorns cite l'alliage

Sn....................	48
Pb....................	32,5
Bi....................	9
Sb....................	10,5

employé pour les cylindres d'impression.

ALLIAGES D'ÉTAIN, DE BISMUTH ET DE CADMIUM AVEC OU SANS ADDITION DE PLOMB

L'étude de ces alliages a été faite par Hauer, au point de vue de la fusibilité.

Il a conclu que les points de fusion sont proportionnels à la composition atomique :

1° CdSnPbBi.........	68°
2° $Cd^3Sn^1Pb^1Bi^1$......	67°
3° $Cd^1Sn^5Pb^5Bi^5$......	66°
4° $CdPbBi^7$...........	88°
5° $CdPb^3Bi^2$..........	89°
6° $Cd^2Pb^7Bi^4$.........	95°

Les formules ci-dessous correspondent aux compositions centésimales :

	I	II	III	IV	V	VI
Cadmium.....	17,31	13,6	14,3	4	9,7	8,9
Étain.........	18,24	19,0	19,0	»	»	»
Plomb........	32,00	33,4	33,1	44	54,0	57,7
Bismuth......	32,45	34,0	33,6	52	36,3	33,4

Les principaux alliages fusibles de cadmium, d'étain et de bismuth sont les suivants :

Cd	Sn	Bi	POINTS DE FUSION
1	2	3	95°
1	3	5	95°
1	1	2	95°

Mais généralement on ajoute du plomb.
C'est ainsi que l'alliage de Lipowitz renferme :

Cd............................	3
Pb............................	8
Sn............................	4
Bi............................	15
Point de fusion	70°

L'alliage de Wood contient :

Cd............................	2
Pb............................	4
Sn............................	2
Bi............................	5
Point de fusion	71°

D'autres alliages fusibles ont pour composition :

Cd	Pb	Sn	Bi	POINTS DE FUSION
2	11	3	16	77°
10	8	3	8	75°
1	2	1	4	66°

Ces alliages sont employés comme soudures très tendres. L'alliage de Lipowitz est utilisé pour souder le métal anglais.

Certains alliages d'étain, de bismuth et de cadmium ont été essayés comme métal à caractères d'imprimerie, notamment l'alliage :

Cd	20
Bi	50
Sn	30

La question prix de revient a, seule, arrêté cette fabrication.

ALLIAGES ÉTAIN-ZINC-PLOMB

Ces alliages ont été étudiés par Guettier qui donna les résultats suivants[1] :

N° 1 : *Étain*, 76; *zinc*, 12; *plomb*, 12. — Cassure à grains très fins et brillants imitant celle de l'acier. Nerveux, roide, un peu gras à limer, sans tassement. — Texture d'un blanc terne. — L'éclat après la lime disparaît rapidement. — Ne raye pas le papier. — L'alliage est parfaitement mêlé.

N° 2 : *Étain*, 12; *zinc*, 76 ; *plomb*, 12. — Cassure à la manière du zinc à facettes brillantes et avec arrachements. — Nerveux, quoique beaucoup moins que le précédent. — D'une couleur plus bleue, après la lime, que le numéro 1, mais se

1. Comme nous l'avons déjà fait remarquer, ces recherches de Guettier mériteraient d'être reprises d'une façon plus scientifique.

ternissant toutefois moins facilement. — Peu de tassement. — Les surfaces coulées sont recouvertes d'une pellicule très ridée d'un jaune d'or passant au violet. — Une petite partie du plomb sur une hauteur de 0,003 s'est déposée au fond du culot.

N° 3 : *Étain*, 12; *zinc*, 12; *plomb*, 76. — Cassure sans brillant avec arrachement, tirant à la fois sur celui du plomb et sur celui de l'étain. — Plus facile à casser cependant que ces deux métaux. — Plus mou sous le marteau que l'étain, quoique moins flexible. — Plus dur que le plomb seul. — Raye le papier d'une façon très prononcée. — L'alliage est mieux fait que le numéro 2; il n'y a pas de dépôt au culot. — Pas de traces de tassement. — Les mêmes couleurs et même peau à la coulée que le précédent. — La couleur du plomb après la lime.

N° 4 : *Étain*, 34; *zinc*, 33; *plomb*, 33. — Cassure plus terne et moins arrachée que celle du zinc, avec laquelle elle a quelques rapprochements. — D'un poli gris bleu sans éclat brillant et de couleur moins tranchée que le plomb. — L'alliage est bien fait, un peu mou, mais résistant et peu flexible. — Très peu de tassement. — Les surfaces coulées viennent de celles de l'étain, d'un jaune d'or pâle, sans les tons de l'iris. — Raye légèrement le papier.

N° 5 : *Étain*, 10; *zinc*, 45; *plomb*, 45. — Cassure à la manière du zinc à facettes triangulaires et brillantes, mais à fond terne. — Nerveux à la cassure, quoique un peu mou. — Serait peu malléable. — Sans tassement prononcé. — Les surfaces couvertes de peaux très ridées de couleur bleu violet, tirant au jaune sur les bords. — Raye le papier presque autant que le numéro 3. — D'un poli gris terne après la lime.

N° 6 : *Étain*, 45; *zinc*, 45; *plomb*, 10. — Cassure d'un gris un peu terne à points brillants, rappelant celle du fer. — Texture grenue et légèrement cristallisée à la façon de l'étain coulé pur. — Pas de tassement. — La surface des coulées est la même que celle de l'étain. — Raye à peine le papier.

N° 7 : *Étain*, 45; *zinc*, 10; *plomb*, 45. — Cassure sèche, mais

avec arrachement comme l'étain. — L'alliage est plus facile à casser que ce métal. — Sans tassement. — D'un poli gris terne après la lime. — Très malléable, très résistant, beaucoup moins flexible que le plomb et l'étain. — Raye le papier un peu moins que le numéro 5.

Observations générales. — La présence du plomb dans ces alliages leur donne plus de corps, plus de résistance que les alliages étain-zinc n'en ont. — Ils sont cependant aussi gras à la lime que ces derniers. — Les cassures sont, en général, plus caractérisées que celles des alliages étain-zinc. L'alliage numéro 4, par parties égales des trois métaux, ou les alliages sensiblement rapprochés de cette combinaison, sont malléables, quelque peu ductiles, et peuvent être employés très économiquement dans un grand nombre de cas.

L'alliage numéro 2, dur et sec, comme le zinc, quoique plus résistant, peut être utilisé avec succès par les fondeurs. Comme le numéro 3, il est économique, et tous deux peuvent présenter à l'emploi en fonderie de plus grandes ressources que les trois métaux composants pris isolément.

Ces alliages ternaires plus mêlés, plus faits que les alliages zinc-étain ou zinc-plomb ont l'avantage d'être plus nerveux et plus roides sans coûter plus cher. — Les numéros 1, 3 et 7 paraissent très bons pour les frottements ; les numéros 2, 4 et 5, pour les pièces qui demandent une résistance plus grande que celle du zinc pur ; le numéro 6, pour des objets minces exigeant un peu de malléabilité. Ce dernier alliage reproduirait bien les ornements et se prêterait à la ciselure. Les numéros 2, 4 et 5 seraient, pour cet usage, un peu cassants ; les numéros 1, 3 et 7, trop gras.

Ces alliages sont utilisés, en dehors de leur emploi comme antifrictions :

1° En fonderie pour obtenir des objets d'ornementation.

L'alliage le plus employé à cet effet a la composition suivante :

Sn................	45 à 50
Zn................	45 à 40
Pb................	10 à 15

2° Pour la fabrication des caractères d'imprimerie. Ils y sont cependant peu utilisés, le prix de revient étant plus élevé que celui des alliages généralement employés. De plus, pour les caractères un peu fins, le zinc empêche les parties fines de venir.

TYPE DE CAHIER DES CHARGES POUR LES ALLIAGES D'ÉTAIN

CHEMINS DE FER DE PARIS A LYON ET A LA MÉDITERRANÉE

NUMÉRO DU TITRE	COMPOSITION		SOUDURES A L'ÉTAIN	TOLÉRANCES
	ÉTAIN	PLOMB		
1	45	55	Employée par les ferblantiers	Il est accordé pour la proportion de chacun des métaux prévus pour l'alliage une tolérance en plus ou en moins de 1 0/0 de l'alliage. Le poids total des métaux autres que ceux prévus pour l'alliage ne doit pas dépasser 1/2 0/0 de poids de l'alliage.
2	40	60	Employée par les zingueurs	
3	66	34	Employée pour souder le bronze siliceux	

CONCLUSIONS

Les principaux alliages d'étain qui intéressent l'industrie sont :

1° Les alliages d'étain et de plomb :

A. Renfermant 18 0/0 Pb (alliages pour potins) ; il est formé d'étain entouré de l'eutectique étain-plomb ;

B. Contenant 40 0/0 Pb (joaillerie commune, jouets, objets de Paris), lequel correspond presque à l'eutectique (37 0/0 Pb) ;

C. Formés de 55 0/0 Pb et 40 0/0 Sn ou 34 0/0 Pb et 66 0/0 Sn, constituant les soudures tendres ; ces alliages, bien que différant un peu de l'eutectique s'en rapprochent beaucoup, le premier ayant du plomb libre, le second de l'étain libre.

L'étain apporte à l'alliage de la dureté, le plomb de la douceur.

Mais le prix de revient et la nocivité des alliages à teneur

importante en plomb entrent pour beaucoup dans la détermination de la composition de ces alliages.

2° Les alliages d'étain et d'antimoine :

A. Renfermant environ 80 0/0 Sn, utilisés pour les poteries d'étain et les planches à gravure.

B. Contenant de 90 à 94 0/0 Sn, constituant le métal Britannia (lequel est souvent plus complexe);

C. Renfermant environ 80 0/0 Sn employés comme coussinets de machines;

D. Contenant de 80 à 90 0/0 Sn, utilisés pour certaines pièces moulées, notamment en robinetterie.

Tous ces alliages, qui renferment plus de 10 0/0 d'antimoine doivent contenir les cristaux durs de la combinaison SbSn.

Plus la teneur en antimoine est importante (à partir de 10 0/0), plus la dureté est grande, mais plus aussi augmente la fragilité.

On conçoit donc très bien que, dans ces alliages binaires, on n'ait pas pu dépasser une teneur d'antimoine d'environ 20 0/0 sans avoir à craindre une trop grande fragilité.

Les alliages d'étain et de bismuth ne sont utilisés que comme alliages fusibles.

Quant aux alliages d'étain et de cadmium, ils n'offrent aucune propriété industrielle particulièrement intéressante.

En résumé, parmi les alliages étudiés dans ce chapitre, ceux d'étain et de plomb, d'une part, et ceux d'étain et d'antimoine, d'autre part, sont les seuls employés.

Les propriétés des premiers participent de celles des deux métaux.

Pour les derniers, ils sont utilisés à cause de leur dureté relative, laquelle est due à la présence d'une combinaison spéciale SbSn, qui se présente en cristaux cubiques très remarquables.

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE XIII

Behrens, *Das mikroskopische Gefüge der Metalle und Legierungen.*

Charpy, *Contribution à l'étude des Alliages*, p. 144 (Sn-Sb); — *Id.* p. 121 (Sn-Pb).

Guettier, *Guide pratique des Alliages* (*la Fonderie en France*) (Sn-Zn ; Sn-Pb).

Herschkowitsch, *Zeitschrift für physikalische Chemie*, t. XXVIII, p. 123 (Sn-Zn).

Hiorns, *les Alliages métalliques* (traduction Boudouard), Steinheil, 1900 (Sn-Sb) (*Alliages fusibles*).

Knab, *les Alliages métalliques*, Steinheil (*Alliages fusibles*).

Kupferr, *Annales de Chimie et de Physique*, XL, 289 (Sn-Pb).

Laurie, *Journal of chemical Industry*, CCCII, p. 104 (Sn-Pb; Sn-Sb, Sn-Bi).

Reinders, *Proc. Mechanical Engineers*, 1904 (Sn-Sb).

Roland Gosselin, *Contribution à l'étude des Alliages* (Étude de M. Gautier) (Sn-Sb).

Rudberg, *Poggendorff's Annalen*, XVIII, p. 240 (Sn-Bi, Sn-Zn).

CHAPITRE XIV

ALLIAGES DE PLOMB

Le plomb est un des métaux qui s'allient le plus difficilement et qui tendent le plus à former liquation.

Les principaux alliages de plomb sont :

Plomb-étain, dont il a été question au chapitre XIII ;

Plomb-cuivre, dont nous avons parlé au chapitre XII ;

Plomb-antimoine ;

Plomb-bismuth ;

Plomb-zinc ;

Plomb-cadmium ;

Plomb-arsenic ;

Et des alliages plus complexes, tels que plomb-cuivre-étain déjà étudiés.

ALLIAGES DE PLOMB ET D'ANTIMOINE

Étude théorique. — COURBE DE FUSIBILITÉ. — Cette courbe se compose de deux branches dont la rencontre indique un eutectique. Celui-ci correspond à 13 0/0 d'antimoine qui fond à 228° (*fig.* 190).

Il semble donc que le plomb et l'antimoine ne forment pas de composé défini.

MÉTALLOGRAPHIE (Album, Pl. LXXXII, Phot. 325 à 328). — La métallographie de ces alliages, qui a été étudiée par M. Charpy, prouve bien que la constitution est en parfait

accord avec la courbe de fusibilité. Les alliages contenant de 0 à 13 0/0 d'antimoine sont formés de plomb englobé dans l'eutectique ; au-delà de 13 0/0, on a des cristaux d'antimoine qui se trouvent au milieu de ce même eutectique. Nous donnons trois micrographies. L'une représente plus spécialement l'eutectique ; les trois autres, des cristaux d'antimoine plus ou moins entourés d'eutectique, suivant le pourcentage de ce métal.

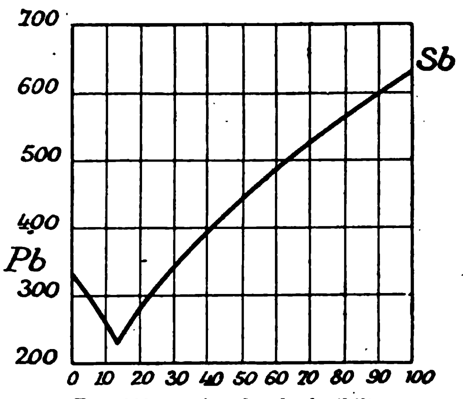


Fig. 191. — Courbe de fusibilité des alliages plomb-antimoine.

Résistance électrique. — La courbe de conductibilité présente un minimum, qui correspond à environ 9 0/0 d'antimoine (*fig.* 191).

Force électromotrice de dissolution. — Laurie a trouvé que la force électromotrice varie d'une façon continue avec la composition.

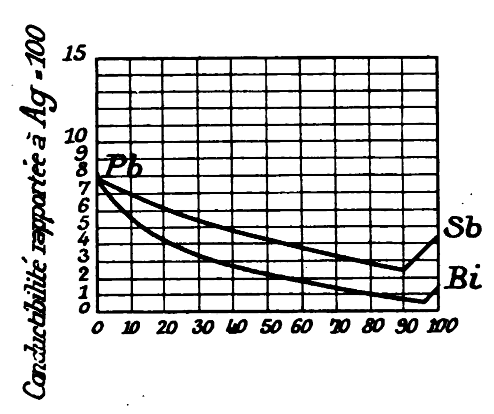


Fig. 192. — Résistance électrique des alliages plomb-antimoine et plomb-bismuth.

Étude industrielle. — Fabrication. — On prépare très souvent le plomb antimonié en traitant au four à réverbère de vieilles matières, des antifrictions notamment, et en les affinant. On cherche à enlever tout le zinc qu'elles peuvent contenir.

Propriétés. — Voici comment s'exprime Guettier sur les propriétés des alliages antimoine-plomb :

« L'antimoine augmente la dureté du plomb. Il rend ce métal très cassant quand il lui est allié en proportions notables.

« L'alliage à parties égales est sec, poreux, cassant. Ces défauts augmentent à mesure que s'élève la proportion d'antimoine. Ils s'effacent, au contraire, quand l'antimoine diminue pour faire place au plomb. Un alliage de Sb = 1, Pb = 4, est compact et beaucoup plus dur que le plomb, tout en restant malléable.

« Un alliage de Sb = 1, Pb = 8, est très tenace et d'une densité plus grande que la densité proportionnelle des deux métaux. Il est plus malléable que le précédent et reste encore dur.

« La dureté communiquée par l'antimoine, l'augmentation de ténacité, le développement de la densité se font sentir d'une manière puissante jusque dans l'alliage Sb = 1, Pb = 16. »

D'autre part, M. Charpy a étudié la résistance à la compression et à l'usure de ces alliages (*Bulletin de la Société d'Encouragement*). Nous examinerons cette étude dans le chapitre consacré aux antifrictions (Voir p. 865).

Utilisations. — Les alliages plomb-antimoine sont utilisés :

A. Pour la confection des caractères d'imprimerie et des planches à graver ;

B. Pour la construction de certaines parties d'instruments de musique ;

C. Pour la fabrication de plaques d'accumulateurs et de balles ;

D. Comme antifrictions.

A. *Alliages pour caractères d'imprimerie et pour planches à graver*. — Un alliage devant être employé dans la confection des caractères d'imprimerie doit jouir des propriétés suivantes :

1° Être fusible ;

2° Ne pas être trop fragile ;

3° Posséder une certaine dureté qui lui permette de résister à la pression nécessaire à l'impression ;

4° Être cependant assez mou pour pouvoir être retouché aisément ;

5° Se dilater pendant le refroidissement de façon à bien épouser la forme du moule ;

6° Être homogène.

De tous les alliages plomb-antimoine, celui qui correspondrait le mieux à ces désidérata serait l'alliage :

Pb	85 0/0
Sb	15 0/0

Il possède, en effet, une certaine dureté et une certaine dilatation pendant le refroidissement, mais il a une structure trop cristalline et présente une grande fragilité. De plus, il est trop rapidement attaqué par les agents de décapage.

Enfin, à l'heure actuelle, on se montre beaucoup plus exigeant pour les caractères d'imprimerie. Avec les machines rotatives, avec les papiers actuels, il faut une dureté minéralogique plus élevée.

Aussi a-t-on cherché à améliorer les alliages par l'addition d'autres métaux, notamment de l'étain et du bismuth.

Quant au zinc, qui a été parfois utilisé, il est regardé par les fondeurs modernes comme un corps très nuisible. Il enlève de la fluidité et empêche les parties fines des caractères de bien venir.

Voici les principaux types employés *autrefois* :

α. — CARACTÈRES D'IMPRIMERIE

1°	Pb	90	
	Sb	10	
2°	Pb	85	
	Sb	15	
3°	Pb	80	
	Sb	20	
4°	Pb	75	
	Sb	25	
5°	Pb	64	
	Sb	8	
	Sn	12	
	Zn	16	(Hiorns)

Les alliages plomb-antimoine ne sont guère plus utilisés que pour les *blancs*, c'est-à-dire les parties qui n'impriment pas.

β. — PETITS CARACTÈRES

1°	Pb	92
	Sb	8
2°	Pb	84
	Sb	16
3°	Pb	75
	Sb	25
4°	Pb	70
	Sb	15
	Bi	15
5°	Pb	64
	Sb	16
	Sn	20

On peut dire qu'à l'heure actuelle le *type le meilleur* pour le caractère d'imprimerie correspond à la formule :

Pb	50 à 55
Sb	25 à 30
Sn	25 à 15

Un tel alliage renferme beaucoup d'étain; il est donc d'un prix élevé. Aussi cherche-t-on souvent à en diminuer la teneur. On utilise notamment l'alliage:

Pb	60
Sb	30
Sn	10

Les planches pour graver, particulièrement celles utilisées pour graver la musique, sont formées d'alliages analogues. On utilisait autrefois et on emploie encore quelquefois :

1°	Pb	64
	Sb	8
	Sn	12
	Zn	16
2°	Pb	60
	Sb	2,5
	Sn	37,5

Cependant on utilise le plus souvent :

Pb	60
Sb	40

qui donne d'excellents résultats ;

Pb	80
Sb	15
Sn	5

qui donne des résultats passables ;

Pb	82 à 80
Sb	18 à 20

qui donne de très mauvais résultats.

B. *Alliages pour instruments de musique.* — Certaines parties d'instruments de musique sont faites en alliages plomb-antimoine. C'est ainsi que les clefs de flûte et de clarinette sont faites en un alliage du type :

Pb	67
Sb	33

C. *Alliages pour plaques d'accumulateurs et balles.* — Dans les accumulateurs au plomb, les plaques souvent de forme très complexe que l'industrie moderne utilise pour faire les éléments à oxyde rapporté ne peuvent être préparées généralement en plomb pur, ce métal étant trop mou.

Pour le durcir, on y ajoute de petites quantités d'antimoine qui n'amènent pas avec elles la fragilité.

Ces alliages sont du type :

Pb	94
Sb	6

On ne descend pas au-dessous de 5 0/0 d'antimoine, la dureté n'étant pas suffisante ; on ne dépasse pas 8 0/0; la fragilité devient trop grande au-delà de ce pourcentage.

Le même alliage sert pour obtenir des balles d'une dureté assez élevée.

Ces alliages ont été l'objet d'une étude, au point de vue de la trempe, de la part de M. Dubosc qui a montré qu'en refroi-

dissant brusquement un alliage de plomb et d'antimoine renfermant entre 3 et 7 0/0 d'antimoine et porté entre 180° et 240° on obtient un produit, qui offre une grande résistance à la compression, sans diminution de la malléabilité. M. Dubosc semblait indiquer que l'eutectique diminuait au fur et à mesure que la température de trempe augmentait.

Nous avons cherché à préciser par des expériences nombreuses, l'effet de la trempe sur les alliages plomb-antimoine, et nous sommes arrivés à ces conclusions que, dans les recherches de M. Dubosc, il faut distinguer deux cas : lorsque la température de trempe est supérieure à 220°, on est au-dessus du solidus et les variations obtenues sont celles que l'on obtiendrait avec n'importe quel alliage. Au-dessous, les transformations tant mécaniques que micrographiques sont beaucoup moins accusées. — Il semble cependant que l'eutectique, tout en gardant son importance relative, soit distribué d'une façon plus homogène. Mais le phénomène n'est pas net et ne peut recevoir une explication plausible.

E. *Alliages utilisés comme antifrictions.* — Bien que nous parlions plus loin des alliages utilisés comme antifrictions, nous donnerons ici les principaux types des alliages plomb-antimoine employés pour cet usage.

Premier type :

Pb	83,5
Sb	16,5

métal Magnolia, analysé par Dudley et cité par Ledebur;

Deuxième type :

Pb	84,3
Sb	14,4
Fe	0,6

métal pour coussinets de wagons (Dudley) ;

Troisième type :

Pb	94
Sb	16

cité par Dudley ;

Quatrième type :

Pb	88
Sb	12

cité par Dudley.

ALLIAGES DE PLOMB ET DE BISMUTH

Étude théorique. — Courbe de fusibilité. — Nous avons déterminé la courbe de fusibilité des alliages plomb-bismuth, dont nous n'avons trouvé mention dans aucun mémoire[1].

La courbe est formée de deux branches dont le point de rencontre indique un eutectique (*fig.* 193).

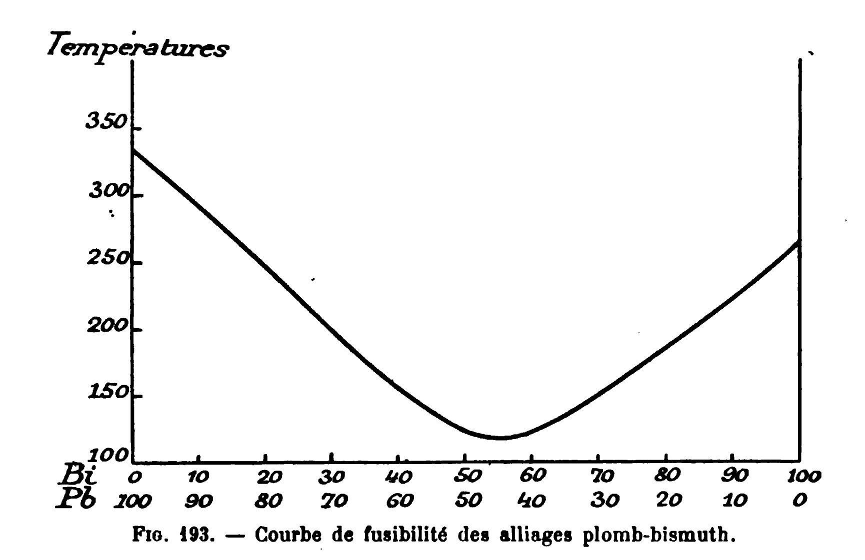


Fig. 193. — Courbe de fusibilité des alliages plomb-bismuth.

Cet eutectique correspond à 45 0/0 de plomb; il fond à environ 118°.

Métallographie (Album, Pl. LXXXIII, Phot. 329 à 332). — La métallographie donne des résultats absolument concordants

1. Ce travail achevé, nous rencontrons les déterminations de MM. Heycock et Neville, qui ont trouvé les mêmes résultats que nous.

avec ceux de la courbe de fusibilité ; jusqu'à 45 0/0 de plomb, on a des cristaux de bismuth entourés d'eutectique ; au-delà de 45 0/0 de plomb, on trouve du plomb entouré d'eutectique, celui-ci étant en quantité d'autant plus faible qu'on s'approche plus du plomb pur.

Résistance électrique. — Matthiessen a montré que la courbe de résistance possède un minimum pour 5 0/0 de bismuth (*fig.* 192).

Force électromotrice de dissolution. — Laurie a montré qu'elle était constante.

Étude industrielle. — Propriétés. — Les propriétés des alliages plomb-bismuth ont été étudiées par Guettier.

Ces deux métaux s'allient instantanément par la fusion sans précautions exceptionnelles.

Les alliages sont malléables et ductiles tant que la proportion du bismuth n'excède pas celle du plomb ; ils ont même beaucoup plus de ténacité que le plomb.

L'alliage de 2 bismuth, 3 plomb est environ dix fois plus dur que le plomb pur.

Les composés de bismuth et de plomb ont généralement une couleur gris foncé, d'un ton intermédiaire entre la couleur de l'étain et celle du plomb. Leur cassure est lamelleuse, leur densité est plus considérable que la densité moyenne de l'un ou de l'autre métal pris isolément.

Un alliage à parties égales de bismuth et de plomb donne une densité de 10,71. Cet alliage blanc, brillant, est sensiblement plus dur et plus malléable que le plomb. La ductilité et la malléabilité, qui s'effacent à mesure que le bismuth augmente, comme proportion dans l'alliage, se développent au contraire en même temps que le plomb domine.

Un alliage de 1 bismuth, 2 plomb, est très ductile et peut se laminer en feuilles minces, non susceptibles de se gercer. Il fond, d'après Berthier, à 166°.

Les alliages plomb-bismuth n'offrent pas d'intérêt industriel.

ALLIAGES DE PLOMB ET DE CADMIUM

Étude théorique. — Courbe de fusibilité. — Nous avons déterminé la courbe de fusibilité des alliages plomb-cadmium. Nous l'avons trouvée formée de deux branches qui, à leur point de rencontre, indiquent un eutectique.

Celui-ci correspond à 75 0/0 de plomb et 25 0/0 de cadmium. Il fond à 230° (*fig.* 194).

Métallographie (Album, Pl. LXXXIV, Phot. 333 et 334). —

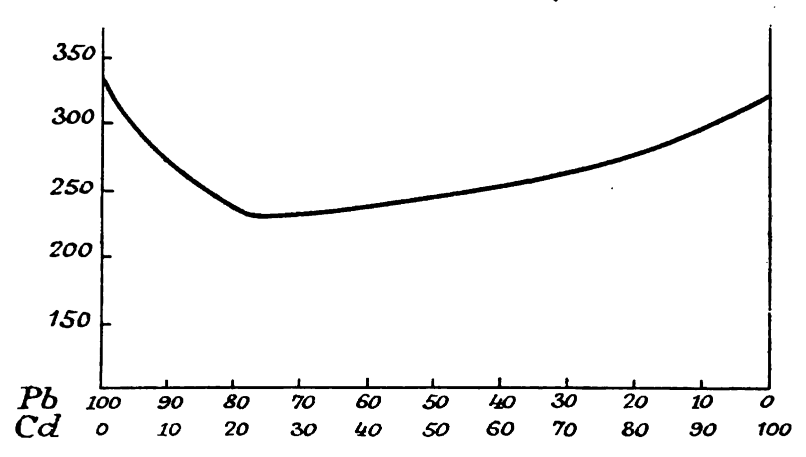


Fig. 194. — Courbe de fusibilité des alliages plomb-cadmium.

L'étude micrographique de ces alliages conduit aux mêmes conclusions. Les alliages qui renferment moins de 25 0/0 de cadmium sont constitués de plomb entouré d'eutectique, tandis que les alliages contenant plus de 25 0/0 de cadmium sont formés de ce métal entouré d'eutectique.

Force électromotrice de dissolution. — Laurie a montré que la force électromotrice de dissolution de ces alliages était sensiblement constante.

Phénomène spécial. — Les alliages plomb-cadmium pré-

sentent un phénomène très spécial, dont l'explication n'a pas été donnée. Ce phénomène nous a été signalé par M. A. Le Chatelier. Il est plus particulièrement visible avec l'alliage à 30 0/0 de cadmium et consiste essentiellement dans un dégagement de chaleur des plus importants au moment de la solidification, qui se traduit même par le départ de nombreuss étincelles et d'un boursouflement de toute la masse. En même temps une partie du cadmium s'oxyde.

Résistance électrique. — Matthiessen a trouvé que la résistance électrique varie suivant la ligne droite réunissant les valeurs de la conductibilité des deux métaux initiaux.

Étude industrielle. — Ces alliages n'ont été l'objet d'aucune application industrielle.

ALLIAGES DE PLOMB ET DE ZINC

Nous ne connaissons aucune étude sur ces alliages. Cela provient certainement de ce que ces deux métaux, plomb et zinc, sont impossibles à allier, surtout lorsque les proportions de plomb sont un peu importantes.

Dans son livre, *Guide des Alliages métalliques*, Guettier décrit un certain nombre d'expériences qu'il a faites et dans lesquelles il a toujours remarqué une liquation telle que ces alliages ne peuvent présenter aucun intérêt. Toutefois, on introduit assez souvent quelques petites quantités de plomb dans le zinc en vue de la préparation d'objets utilisés pour l'ornementation.

C'est là le seul emploi des alliages de plomb et de zinc.

ALLIAGES DE PLOMB ET D'ARSENIC

Aucune étude théorique n'a encore été faite, à notre connaissance, sur les alliages plomb-arsenic.

Guettier a donné quelques caractères intéressants de ces alliages :

Les combinaisons s'opèrent, non sans difficulté, et ne sont pas faciles également à toutes les proportions. Au-delà des proportions : arsenic, 16 parties; plomb, 84 parties, qui semblent être le degré le plus élevé d'une combinaison atomique intime, les arséniures dans lesquels la dose d'arsenic se développe sont aisément décomposés par la chaleur. De plus, le métal devient aigre et prend une cassure analogue à celle du bismuth, bien que d'une couleur plus foncée.

Les arséniures de plomb sont d'autant moins ductiles et d'autant plus cassants qu'ils renferment plus d'arsenic; leur cassure est lamellaire et éclatante; leur couleur est d'un gris blanc. Ils sont très fusibles.

La chaleur blanche fait disparaître une partie notable d'arsenic et semble devoir laisser un arséniure fixe dans les proportions : arsenic : 1, plomb : 2, qui soutient la plus haute température sans perdre de son poids.

On place dans un creuset en fonte le plomb à fondre avec de l'acide arsénieux et du charbon de bois. Il se forme de l'arsenic qui s'unit avec le plomb. Ou bien on introduit de l'arsenic dans le plomb fondu.

La teneur d'arsenic varie avec les pays. En France, on utilise l'alliage :

Pb	99,100
As..................	0,900

En Angleterre, l'alliage employé est :

Pb	99,200
As..................	0,300

L'addition de l'arsenic a pour but :

1° De rendre le plomb plus dur ;

2° De lui permettre de prendre plus aisément la forme sphérique.

Pour préparer le plomb de chasse, on verse l'alliage fondu dans une cuve dont le fond est percé de trous; le métal tombe dans un bassin rempli d'eau, placé au-dessous et à une assez

grande distance de cette cuve. La grosseur des grains dépend essentiellement des trous du bassin ; ceux-ci sont suffisamment espacés pour éviter que les grains tombant ne se rencontrent dans leur course. Enfin, l'eau du bassin est légèrement additionnée de sulfure de sodium, qui empêche l'oxydation du métal par suite de formation d'une mince couche protectrice de sulfure de plomb; elle est souvent surmontée d'une faible épaisseur d'huile qui permet aux grains de mieux prendre la forme sphérique.

Cette méthode, relativement compliquée, est souvent remplacée par le procédé suivant : le métal en fusion placé dans un réservoir, d'où il s'échappe par un mince filet, est versé sur un disque qui tourne avec une grande vitesse; il se divise immédiatement et vient frapper un écran qui permet de rassembler les grains. Leur grosseur dépend de la vitesse rotative du disque.

AUTRES ALLIAGES DE PLOMB

Parmi les alliages de plomb plus complexes que ceux que nous venons d'étudier et que l'industrie utilise, il faut citer:

Les alliages : *cuivre-étain-plomb*, que nous avons étudiés; *cuivre-étain-zinc-plomb*, qui rentrent encore dans les bronzes; *étain-zinc-plomb*, *plomb-antimoine-arsenic*, etc., et surtout les alliages *plomb-étain-antimoine*.

Nous parlerons de quelques-uns de ces alliages au chapitre des *Antifrictions* (p. 865).

CONCLUSIONS

Les alliages de plomb qui intéressent l'industrie sont :

1° Les alliages de plomb et d'antimoine :

A. Contenant de 75 à 92 0/0 de plomb, utilisés comme caractères d'imprimerie.

Ils sont formés de plomb libre entouré de l'eutectique

Pb-Sb, lorsque la teneur en antimoine est inférieure à 13 0/0 ; d'antimoine libre entouré du même eutectique, lorsque le pourcentage d'antimoine est supérieur à 13 0/0, ce qui est le cas général, la composition la plus fréquente étant Sb = 15 0/0, Pb = 85 0/0.

Il est bien évident que plus il y a d'antimoine plus l'alliage est dur.

Actuellement on utilise surtout les alliages ternaires Pb-Sn-Sb.

B. Renfermant 93 à 95 0/0 de plomb (plaques d'accumulateurs, balles durcies, etc.); on voit que cet alliage est constitué par du plomb libre entouré d'eutectique.

C. Contenant environ 83 à 94 0/0 de plomb, utilisés comme antifrictions. Ici l'antimoine libre en petites quantités joue le rôle de corps dur devant résister à l'usure, tandis que l'eutectique, qui renferme le plomb, joue le rôle de corps plastique.

2° L'alliage plomb-arsenic utilisé pour plomb de chasse et renfermant 0,300 à 0,900 0/0 As ; nous avons vu les propriétés qui le faisaient utiliser.

Quant aux alliages plomb-bismuth, plomb-cadmium, ils n'offrent aucun intérêt.

En un mot, les alliages de plomb et d'antimoine, d'une part, et l'alliage plomb-arsenic, d'autre part, sont les seuls usités. Les premiers doivent leur emploi à leur dureté et à leur plasticité simultanées.

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE XIV

Charpy, *Contribution à l'étude des Alliages*, p. 107 (Pb-Sb).

Dubosc, *Association internationale des méthodes d'essais* (*Groupe français*), 1905 (Pb-Sb).

Guillet, *Id.* (Pb-Sb).

Guettier, *le Guide du Fondeur* (Pb-Sb; Pb-Zn ; Pb-As) ; — *la Fonderie en France* (*Id.*).

Hiorns, *les Alliages métalliques* (traduction Boudouard), Steinheil, éditeur (Pb-Sb).

Laurie, *Journal of Chemical Society*, CCCII, p. 104 (Pb-Sb).

CHAPITRE XV

ALLIAGES DE CADMIUM

Les alliages de cadmium sont très peu employés dans l'industrie. Le prix de ce métal (environ 12 à 15 francs le kilogramme) est un obstacle à son emploi. Il faut d'ailleurs ajouter qu'il n'apporte pas avec lui des propriétés mécaniques telles que son utilisation éveille l'attention des industriels.

Il faut noter que les alliages cadmium-zinc ont été étudiés théoriquement.

ALLIAGES DE CADMIUM ET DE ZINC

Étude théorique. — Courbe de fusibilité. — La courbe de fusibilité de ces alliages comprend deux branches qui viennent se couper en un point eutectique correspondant à 10 0/0 de zinc. Cet alliage fond à 250°.

Cette courbe a été déterminée par M. Roland Gosselin (*fig.* 195).

Métallographie. — Les examens micrographiques que nous avons faits sur les alliages cadmium-zinc nous ont montré une coïncidence complète entre la micrographie et la courbe de fusibilité.

Au-dessous de 8 0/0 de zinc, on trouve du cadmium entouré de l'eutectique ; ces alliages sont fort délicats à attaquer et plus encore à photographier.

Les acides étendus donnent cependant des résultats assez nets.

Au delà on trouve des dendrites de zinc entourées de l'eutectique.

Résistance électrique. — La courbe de conductibilité déterminée par Matthiessen est une ligne droite. Elle confirme absolument les recherches précédentes.

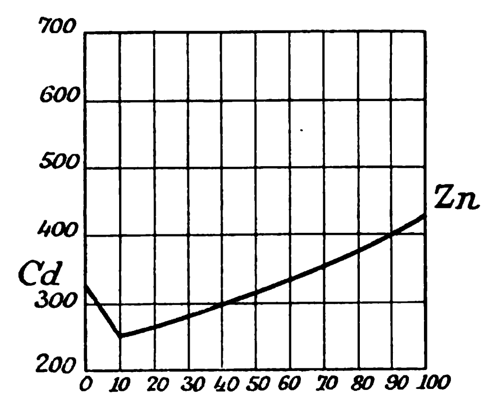


Fig. 195. — Courbe de fusibilité des alliages cadmium zinc.

Force électromotrice de dissolution. — Elle est sensiblement constante (Laurie).

CONCLUSIONS

Les alliages de cadmium ne sont pas susceptibles d'applications, étant donné le prix élevé du cadmium.

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE XV

Laurie, *Journal of the Chemical Industry*, CCCII, p. 104 (Cd-Zn).

Roland Gosselin, *Contribution à l'étude des alliages métalliques* (Mémoire de M. H. Gautier), p. 107 (Gd-Zn).

CHAPITRE XVI

ALLIAGES DE ZINC

Les principaux alliages binaires de zinc sont :
Les alliages zinc-cuivre, étudiés au chapitre xx;
Les alliages zinc-étain, étudiés au chapitre xx;
Les alliages zinc-plomb, étudiés au chapitre xx;
Les alliages zinc-cadmium, étudiés au chapitre xx;
Les alliages zinc-antimoine;
Les alliages zinc-bismuth.

Nous devons étudier ces deux derniers alliages au point de vue théorique.

ALLIAGES DE ZINC ET D'ANTIMOINE

Étude théorique. — Courbe de fusibilité. — Cette courbe, établie par les recherches de M. Roland Gosselin, se compose de quatre branches qui semblent indiquer l'existence de deux combinaisons qui seraient voisines de 13 et de 60 0/0 d'antimoine. La courbe indique également trois eutectiques, dont deux très nets qui correspondent aux alliages renfermant 3 et 77 0/0 d'antimoine et fondant à 407 et 495°; le troisième, qui est beaucoup moins marqué, correspond à peu près à 15 0/0 d'antimoine et fond à 480° (*fig.* 196).

L'étude de ces alliages vient d'être reprise par M. Monkemeyer (*Journ. of the Society of Chemical Industry*, XXIV, 137, 1905) qui est en désaccord avec M. Roland Gosselin sur plusieurs points. Les maxima correspondent à 55,04 0/0 Sb et 64,52 0/0 Sb; les eutectiques correspondent à 2,5; 62,5 et 79 0/0 Sb et fondent à 411, 539 et 507°.

Métallographie (Album, Pl. LXXXV, Phot. 335 à 338). — Nous avons étudié la micrographie des alliages zinc et antimoine et nous avons constaté qu'il y a sensiblement concordance entre la courbe de fusibilité de Monkemeyer et la microstructure. On retrouve bien les trois eutectiques et les deux combinaisons.

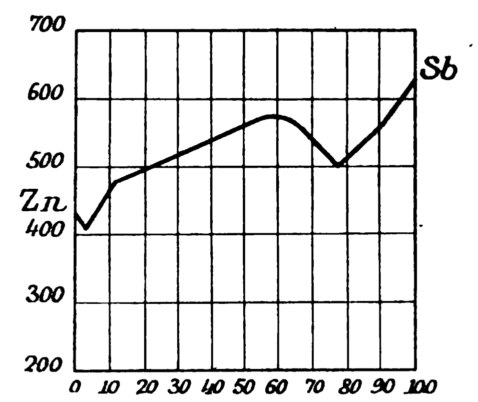


Fig. 196. — Courbe de fusibilité des alliages zinc-antimoine (Roland Gosselin).

Les micrographies que nous donnons représentent :

1° Les cristaux de la première combinaison entourés du premier eutectique;

2° Ces mêmes cristaux plus développés;

3° Le troisième eutectique;

4° Des cristaux d'antimoine entourés d'eutectique.

Force électromotrice de dissolution. — M. Herschkowitsch a mis en vue par cette méthode la combinaison ZnSb qui correspond au deuxième maximum de la courbe de M. Monkemeyer.

Étude industrielle. — Les alliages antimoine-zinc sont extrêmement cassants et oxydables.

Ils ne sont susceptibles d'aucune application.

ALLIAGES DE ZINC ET DE BISMUTH

Étude théorique. — Courbe de fusibilité. — La détermination de la courbe de fusibilité présente un point très particulier :

Les alliages qui renferment plus de 18 0/0 de zinc ne donnent pas de point de solidification déterminé. Ce fait a été signalé pour la première fois par Wright (*Journal of the Chemical Industry*, 1890, p. 945).

M. Roland Gosselin a précisé ce fait; il semble que le zinc et le bismuth forment une combinaison qui, à l'état liquide, n'est pas miscible en toutes proportions avec le zinc. Il y a alors liquation.

Quant aux alliages qui renferment moins de 18 0/0 de zinc, ils donnent une courbe de points de fusion qui forment deux branches et indiquent un eutectique fondant à 240° et correspondant à 4 0/0 de zinc environ.

Métallographie (Album, Pl. LXXXVI, Phot. 339). — L'examen micrographique de ces alliages nous a donné les résultats suivants :

Ceux renfermant moins de 4 0/0 sont formés de zinc entouré d'un eutectique.

Ceux contenant de 4 à 18 0/0 de zinc montrent toujours de l'eutectique et des cristaux assez nets qui augmentent avec le zinc.

Quant à ceux contenant plus de 18 0/0 de zinc, lesquels se séparent, comme nous l'avons dit, en deux parties, ils présentent, d'une part, une srtucture semblable à celle du zinc pur, d'autre part la même structure que les alliages à 18 0/0; les cristallites n'augmentent plus quand le zinc augmente.

Force électromotrice de dissolution. — Elle est sensiblement constante (Laurie).

Étude industrielle. — Les alliages de zinc et de bismuth sont extrêmement fragiles ; leur cassure est cristalline, plus encore que celles du zinc ou du bismuth considérés isolément.

Ils ne sont d'aucun emploi dans l'industrie.

ALLIAGES COMPLEXES DE ZINC

On utilise de nombreux alliages complexes de zinc. Qu'il nous suffise de rappeler les bronzes et les laitons et de nommer les antifrictions que nous étudions plus loin.

CONCLUSIONS

En dehors de ceux déjà étudiés (bronzes, laitons, etc.), les alliages de zinc ne présentent pas d'intérêt.

Les alliages de zinc et d'antimoine ou de zinc et de bismuth sont trop brisants pour être utilisés.

TYPE DE CAHIER DES CHARGES POUR LE ZINC

ARTILLERIE

Qualité de la matière. — Le zinc est de la première qualité. Il contient au plus 0,05 de matières étrangères.

Parmi ces matières :

Le plomb ne doit pas figurer	pour plus de		12	pour 1.000
Le fer	—	—	2	—
Le cadmium	—	—	1	—
L'arsenic et l'antimoine réunis			1	—
Le cuivre	—	—	1	—

Un échantillon par coulée est adressé à l'Inspection des Forges pour être analysé par le Laboratoire de la Section technique de l'Artillerie.

Tolérances. — Si la commande ne stipule pas de tolérances spéciales, les tolérances sur les dimensions des feuilles de zinc sont celles qui sont indiquées pour les feuilles de cuivre.

État des surfaces. — Les feuilles de zinc ont une épaisseur uniforme en tous leurs points ; elles devront présenter des surfaces parfaitement nettes, exemptes de soudures, pailles, criques, gerçures, dartres, ou autres défauts pouvant nuire à leur aspect ou à leur solidité ; elles sont rigoureusement planes et bien dressées, leurs bouts d'équerre sans bavures, et doivent être soigneusement ébarbées.

Essais de pliage. — Les lamelles d'épreuves sont prélevées en travers, de préférence dans les chutes ou dans les découpures intérieures. Les lamelles de 1 millimètre d'épaisseur et au dessous doivent se rabattre au maillet sans criques ; les lamelles plus épaisses doivent se relever à angle vif sans se gercer ni se rompre.

Essais d'enroulement. — Des bandes prélevées dans le sens perpendiculaire au laminage sur les rognures des feuilles doivent pouvoir être roulées à froid sur un mandrin de 11 millimètres de diamètre sans qu'il se manifeste ni criques, ni gerçures.

Essais de poinçonnage. — Des trous de 5 millimètres de diamètre sont percés dans les chutes des feuilles au moyen d'un poinçon tronconique, la largeur de la partie limitant le trou vers l'extérieur étant égale à deux fois l'épaisseur de la feuille. Il ne doit dans cette opération se produire aucune crique.

Nombre et interprétation des essais. — Il est fait trois essais de chaque espèce par lot de 1.000 kilogrammes ou par fraction de 1.000 kilogrammes de zinc utilisé dans chaque coulée.

Tout essai donnant un résultat défectueux entraîne le rebut du lot, à moins que deux contre-essais effectués sur métal provenant de la même feuille ne donnent de bons résultats.

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE XVI

Herschkowitsch, *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, t. XXVII, p. 123 (Zn-Sb).

Laurie, *Journal of Chemical Industry*, CCCII, p. 104 (Zn-Sb).

Roland Gosselin, *Contribution à l'étude des Alliages métalliques* (Mémoire de M. Gautier), p. 111 (Zn-Sb) ; — *Id.*, p. 108.

Wright, *Journal of the Chemical Industry*, 1890, p. 945 (Zn-Sb).

CHAPITRE XVII

ALLIAGES D'ANTIMOINE

Les principaux alliages d'antimoine sont :

Les alliages antimoine-fer, étudiés au chapitre v ;

Les alliages antimoine-cuivre, étudiés au chapitre vi ;

Les alliages antimoine-étain, étudiés au chapitre xiii ;

Les alliages antimoine-plomb, étudiés au chapitre xiv ;

Les alliages antimoine-arsenic ;

Les alliages antimoine-bismuth, que nous allons étudier, et d'autres alliages plus complexes.

ALLIAGES D'ANTIMOINE ET D'ARSENIC

Voici ce que dit Guettier sur ces alliages, qui ne sont pas industriels :

« Les deux métaux sont susceptibles de s'allier en toutes proportions ; ils se combinent avec dégagement de lumière et reproduisent, à certains égards, par leur réunion, la masse métallique aigre, que l'on trouve dans le règne minéral, où l'antimoine natif est très souvent combiné avec l'arsenic. »

Les alliages d'antimoine et d'arsenic, du reste sans objet, sont très fusibles, mais aussi très aigres et très durs à casser en petites facettes lamellaires, plus caractérisées que celles de l'antimoine pur.

ALLIAGES D'ANTIMOINE ET DE BISMUTH

Étude théorique. — Courbe de fusibilité. — La courbe de fusibilité des alliages bismuth-antimoine doit être envisagée comme représentant un type spécial; elle ne présente qu'un

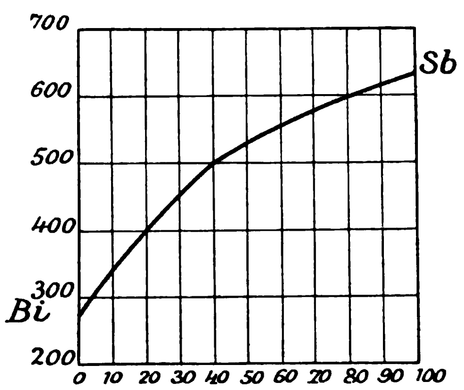


Fig. 197. — Courbe de fusibilité des alliages antimoine-bismuth.

seul arc de courbe; les deux métaux constituants sont isomorphes (*fig.* 197).

Étude industrielle. — Les alliages de bismuth et d'antimoine sont très cassants; ils présentent sensiblement les caractères des alliages bismuth-zinc.

Ils n'ont aucun intérêt industriel.

AUTRES ALLIAGES D'ANTIMOINE

Nous avons vu que les alliages d'antimoine les plus employés étaient :

Les alliages plomb-antimoine, étain-antimoine (potée d'étain, caractères d'imprimerie, planches à graver).

Parmi les alliages ternaires utilisés, il faut citer :

Antimoine-plomb-bismuth ; antimoine-plomb-arsenic ; anti-

moine-étain-bismuth; antimoine-cuivre-plomb; antimoine-étain-plomb; antimoine-plomb-zinc, qui sont utilisés pour fabriquer les caractères d'imprimerie ou les plaques à graver.

L'antimoine rentre dans presque tous les alliages employés en typographie et impression.

Les alliages plomb-étain-antimoine, cuivre-plomb-antimoine, cuivre-zinc-antimoine, etc., font partie des antifrictions, qui sont étudiés plus loin.

Parmi les alliages quaternaires renfermant de l'antimoine et qui présentent un intérêt industriel nous devons citer : les alliages : antimoine-bismuth-étain-plomb et antimoine-bismuth-cuivre-étain qui ont été employés dans la fabrication du métal anglais connu sous les noms de *pewter* et de *métal de la reine*, et qui imite l'argent. Enfin, les alliages antimoine-zinc-fer, antimoine-cuivre-fer-plomb, antimoine-cuivre-étain-zinc et antimoine-cuivre-étain-plomb ont été essayés, d'après Guettier, pour la confection des miroirs métalliques, pour la fabrication des boutons et pour tous produits où l'on a voulu chercher du poli, du brillant, de l'éclat avec une certaine dureté en même temps qu'une douceur suffisante pour être travaillés.

CONCLUSIONS

Les alliages antimoine-bismuth et antimoine-arsenic ne sont pas intéressants pour l'industrie. Ils sont trop fragiles.

Seuls parmi les alliages binaires d'antimoine ceux d'antimoine et étain ou d'antimoine et plomb, étudiés précédemment, présentent quelque intérêt.

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE XVII

Guettier, *le Guide du Fondeur* (Sb-As); — *la Fonderie en France* (Sb-As).

Roland Gosselin, *Contribution à l'étude des Alliages métalliques*, p. 114 (Sb-Bi).

CHAPITRE XVIII

ALLIAGES DE BISMUTH

Les principaux alliages de bismuth sont :

Les alliages bismuth-cuivre, étudiés au chapitre XII;

Les alliages bismuth-étain, étudiés au chapitre XIII;

Les alliages bismuth-plomb, étudiés au chapitre XIV;

Les alliages bismuth-antimoine, étudiés au chapitre XVII;

Les alliages bismuth-fer, étudiés au chapitre VI;

Les alliages bismuth-arsenic, dont nous allons donner les caractéristiques.

Voici ce que dit Guettier sur ces alliages :

« Ces alliages sont plus cassants et plus fusibles que le bismuth. Le bismuth, qui se trouve dans la nature combiné avec l'arsenic, paraît avoir peu d'affinité pour ce métal dans les alliages. On n'a rien fait de pratique, comme alliages de bismuth et d'arsenic. L'arsenic se vaporise rapidement et ne peut être absorbé qu'à doses infimes par le bismuth. De là des difficultés dans la formation de l'alliage, qui, du reste, n'offrant par lui-même aucun caractère particulièrement susceptible d'être étudié, n'a pas tenté les savants. »

Les alliages de bismuth sont, d'ailleurs, sans grande importance, actuellement, dans l'industrie, à part les alliages dits fusibles, où figurent, à côté du bismuth, certains métaux, notamment : l'étain, le plomb, etc. (Pl. LXXXVI, Phot. 34 à 342).

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE XVIII

Guettier, *le Guide du Fondeur* (Bi-As); — *la Fonderie en France* (Bi-As).

CHAPITRE XIX

ANTIFRICTIONS

Définition. — On appelle *antifrictions*, ou *métaux blancs*, ou encore *bronzes blancs*, des alliages employés spécialement pour les pièces frottantes.

Les principaux alliages employés comme antifrictions se partagent en trois groupes :

1° Les alliages binaires;

2° Les alliages ternaires;

3° Les alliages quaternaires.

Les principaux alliages binaires usités comme antifrictions sont :

Les alliages plomb-antimoine, qui ont été étudiés au chapitre XII;

Les alliages cuivre-étain, qui ont été étudiés au chapitre V.

Les alliages ternaires sont les plus employés; les principaux sont :

Les alliages plomb-étain-antimoine;

Les alliages plomb-cuivre-antimoine;

Les alliages étain-cuivre-antimoine;

Les alliages zinc-étain-antimoine;

Les alliages plomb-étain-bismuth.

Il faudrait ajouter encore :

Les alliages cuivre-étain-zinc, qui ont été étudiés au chapitre VI, et les alliages cuivre-étain-plomb, étudiés au même

chapitre ; en un mot, tous les bronzes spéciaux pouvant être utilisés au frottement.

Quant aux alliages quaternaires employés comme antifrictions, ils sont assez peu nombreux et n'ont point été étudiés systématiquement.

M. Charpy a fait sur les antifrictions une étude d'ensemble extrêmement remarquable. Elle se trouve dans le livre *Contribution à l'étude des alliages*, publié par la Société d'Encouragement pour l'Industrie nationale. Nous lui emprunterons de nombreux renseignements.

Nous donnerons d'abord les résultats des études purement théoriques qui ont été faites sur les différents alliages, et nous les comparerons ensuite au point de vue industriel.

ÉTUDE THÉORIQUE DES ANTIFRICTIONS

(Voir Album, Pl. LXXXVII à XCIII, Phot. 343 à 367.)

Alliages plomb-étain-bismuth. — Nous avons déjà étudié la surface de fusibilité de ces alliages[1].

Nous rappellerons brièvement les résultats et nous indiquerons les divers cas qui peuvent se produire au point de vue micrographie.

Considérons (*fig.* 198) un triangle équilatéral ABC et un point M à l'intérieur de ce triangle. Abaissons de ce point des perpendiculaires sur les trois côtés du triangle : la somme Ma + Mb + Mc = la hauteur du triangle Ah.

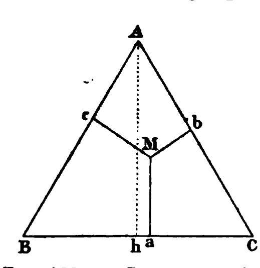


Fig. 198. — Représentation de la surface de fusibilité d'un alliage ternaire.

Le point M sera le point figuratif de l'alliage, qui contiendra une quantité du métal A égale à Ma, du métal B égale à Mb et du métal C égal à Mc. La hauteur Ah et, par conséquent, la somme Ma + Mb + Mc, sera prise comme base d'unité et égale à 100.

1. *Étude théorique des alliages métalliques*, par Léon Guillet (Vve Dunod, éditeur).

Quant à la température de fusion de l'alliage, elle sera portée sur une perpendiculaire menée au plan BAC par le point M. Le lieu des points ainsi obtenus, en faisant varier le point M, constituera la surface de fusibilité. Il est inutile d'insister sur la complexité d'une telle méthode, qui nécessite un nombre d'expériences extrêmement important.

Toutefois, nous résumerons, à titre d'exemples, la détermination faite par M. Charpy de la surface de fusibilité des alliages plomb-étain-bismuth. Soit ABC le triangle équilatéral considéré (*fig.* 199), le point A représentant le plomb ; le point B, le bismuth ; le point C, l'étain. La surface de fusibilité comprend trois nappes qui se coupent suivant les courbes $E\varepsilon$, $E'\varepsilon$, $E''\varepsilon$.

D'après ce que nous avons indiqué précédemment, les points E, E′, E″ correspondent aux alliages eutectiques binaires : le point E, à l'eutectique binaire plomb-bismuth ; le point E′, à l'eutectique binaire plomb-étain ; le point E″, à l'eutectique binaire étain-bismuth.

Quant au point ε, qui est commun aux trois courbes, c'est l'alliage eutectique ternaire, dont la composition a été étudiée par M. Charpy. Cet eutectique correspond à :

Plomb	32 0/0
Étain	15,5 0/0
Bismuth	52,5 0/0
	100,0 0/0

Cet alliage fond à 96°.

Les courbes indiquent la composition des alliages qui peuvent se trouver, à l'état liquide, en équilibre avec deux métaux solides. C'est ainsi que la courbe $E\varepsilon$ donne la composition des alliages qui se trouvent en équilibre à l'état liquide avec du plomb et du bismuth solides ; $E'\varepsilon$ représente les alliages en équilibre à l'état liquide avec du plomb et de l'étain solides ; E″C correspond aux alliages en équilibre à l'état liquide avec le bismuth et l'étain solides.

Seul le point ε représente l'alliage qui peut être en équilibre à l'état liquide avec le plomb, l'étain et le bismuth, tous trois

à l'état solide. On peut ainsi être fixé sur la façon dont se fera la solidification dans l'un quelconque des alliages ternaires plomb, bismuth, étain.

Considérons un alliage D correspondant à un point de l'une des trois nappes de la surface, par exemple la nappe BEεE″; cet alliage se trouvera en équilibre en présence de bismuth solide; au moment où commence la solidification, il laisse déposer du bismuth. Un alliage situé sur l'une des trois lignes de rencontre des surfaces sur E′ε, par exemple, laissera déposer, au moment où commencera la solidification, du plomb et de l'étain.

Quant à l'alliage correspondant à l'eutectique, il se solidifiera en masse, laissant à la fois déposer les trois métaux, plomb, étain, bismuth. M. Charpy a pu, de plus, tracer par interpolations graphiques les isothermes de la surface de fusibilité; elles ont été étudiées de 25 en 25°.

Si l'on considère l'alliage dont le point figuratif est en D sur la nappe BEεE″, supposons-le à l'état liquide et laissons-le refroidir; au moment où la température atteint l'isotherme qui passe par D, il se dépose du bismuth solide; au fur et à mesure que le bismuth se dépose, la composition change; elle varie suivant la droite qui joint le point B au point D prolongée au-delà de ce point D; quand la composition est représentée par le point de rencontre de cette droite avec la courbe εE″, il se dépose en même temps de l'étain et du bismuth; la composition varie suivant la courbe E″ε en allant vers le point ε. Lorsqu'elle arrive à ce point, l'eutectique ternaire se dépose.

La micrographie permet de retrouver le phénomène que nous venons d'analyser.

L'alliage dont nous avons suivi le refroidissement donnera les résultats suivants après attaque à l'acide chlorhydrique:

1° Cristaux de bismuth;

2° Eutectique étain-bismuth, entourant ces cristaux;

3° Eutectique ternaire, étain-plomb-bismuth, qui entoure le tout.

Ces alliages étain-plomb-bismuth constituent assurément l'exemple le plus simple que puissent fournir les alliages ternaires.

Alliages étain-cuivre-antimoine. — Nous avons étudié, au chapitre VII, les alliages étain-cuivre; au chapitre XIII, les alliages étain-antimoine; et, enfin, au chapitre XII, les alliages cuivre-antimoine.

M. Charpy a étudié les alliages étain-cuivre-antimoine, renfermant plus de 50 0/0 d'étain ; ce sont les seuls employés dans l'industrie.

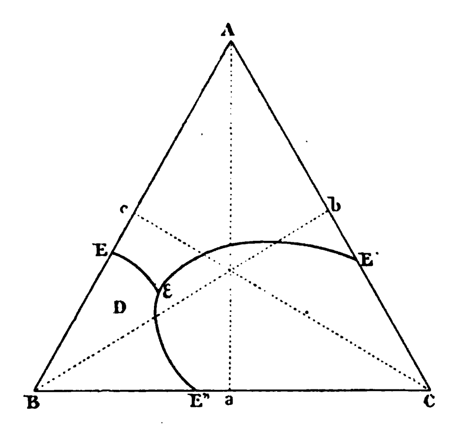


Fig. 199. — Surface de fusibilité des alliages plomb-étain-bismuth.

En étudiant leur microstructure, ce savant y a trouvé les deux combinaisons $SnCu^3$ et SbSn, que l'on rencontre dans les alliages binaires. Le composé $SnCu^3$ apparaît en aiguilles tendant à se grouper en six branches; le composé SbSn se présente en cubes très nets et d'autant plus abondants qu'il y a plus d'antimoine.

Nous donnons (Phot. 347 à 351) les micrographies de plusieurs de ces alliages.

En voici les compositions :

	I	II	III	IV
Sn	82,22	82,30	83,33	85
Sb	11,38	9,60	11,11	12
Cu	5,58	7,30	5,55	3
Autres corps	0,82	0,80		

On y voit généralement les aiguilles de $SnCu^3$.

Alliages plomb-étain-antimoine. — Nous savons que le plomb et l'antimoine ne donnent pas de combinaison (chap. XIV); il en est de même des alliages plomb-étain (chap. XIII); nous avons rappelé, à propos des alliages étain-cuivre-antimoine, les résultats donnés par l'étain et l'antimoine, et la formation du composé SbSn.

L'étude micrographique, faite par M. Charpy, montre, sur les alliages renfermant plus de 10 0/0 d'antimoine, des grains durs englobés dans un eutectique; ces grains ont le même aspect quand on fait varier les proportions, mais leur dureté varie; ils sont probablement formés, conclut M. Charpy, par une solution du composé SbSn et d'antimoine.

On sait que ces corps peuvent cristalliser ensemble.

La constitution de ces alliages est donc analogue à celle des alliages plomb-antimoine. Mais l'étain intervient dans la composition et, par conséquent, dans les propriétés mécaniques aussi bien des grains durs que de l'eutectique.

Nous donnons différentes micrographies d'antifriction plomb-étain-antimoine (Phot. 343 à 346), en particulier l'alliage (Phot. 345) :

Pb	80
Sb	8
Sn	12

Cet alliage, employé par la Compagnie de l'Est pour les garnitures de tiges de piston, ne comprend pas de grains durs; il n'est formé que d'un eutectique.

Au contraire, un alliage ayant pour formule :

Pb	70
Sb	20
Sn	10

utilisé par les Compagnies de l'Est et du Paris-Lyon-Mé-

diterranée pour le garnissage des colliers d'excentriques, est formé de grains durs nombreux englobés dans un eutectique (Phot. 343).

Alliages plomb-cuivre-antimoine. — On sait ce que donnent le plomb et l'antimoine (chap. xiv). D'autre part, le cuivre et l'antimoine ont été étudiés au chapitre xii ; on a vu qu'il se forme la combinaison $SbCu^2$ colorée en violet.

Enfin le plomb et le cuivre ne se mélangent qu'en proportions très faibles; il y a séparation en deux couches : l'une d'elles est formée par du plomb ayant dissous un peu de cuivre; l'autre, constituée par du cuivre ayant dissous un peu de plomb.

Si, dans les alliages plomb-antimoine-cuivre, la proportion de plomb est trop grande, il y a des liquations, et l'alliage n'est point homogène.

Pour des proportions peu élevées de cuivre, il y a formation du composé $SbCu^2$.

Alliages zinc-étain-antimoine. — Nous avons montré, dans le chapitre xiii, que le zinc et l'étain ne donnent pas de combinaison.

Le zinc et l'antimoine donnent deux combinaisons (chap. xiv).

On sait ce qui se passe pour les alliages étain-antimoine (chap. xiii).

L'étude micrographique semble prouver qu'il ne se forme pas de combinaison ternaire. M. Charpy a étudié les alliages renfermant plus de 60 0/0 de zinc. Il peut se trouver dans ces alliages du zinc, de l'étain et une combinaison zinc-antimoine.

Il peut arriver que le zinc se dépose le premier ou l'un des deux autres constituants.

ÉTUDE INDUSTRIELLE DES ANTIFRICTIONS

Les études qui ont été faites sur les antifrictions sont très nombreuses. Nous commencerons par résumer ces études en cherchant à dégager les propriétés particulières à chaque alliage.

Nous établirons ensuite une comparaison.

Alliages plomb-antimoine. — Nous avons donné déjà, au chapitre XIV, les propriétés générales des alliages plomb-antimoine. Nous insisterons simplement sur les essais faits par M. Charpy.

Les moyens que M. Charpy a utilisés pour l'examen pratique des antifrictions ont pour but de mettre en vue deux qualités qui semblent contraires, la dureté et la plasticité. — La plasticité est, en effet, nécessaire pour assurer l'ajustage aussi parfait que possible de la partie frottée sur la partie frottante. D'autre part, il faut un alliage dur; car, en général, le coefficient de frottement est d'autant moindre que les corps en contact sont plus durs, et il faut, de plus, chercher à diminuer le plus possible l'usure, qui tendrait à produire un jeu dans les organes.

On doit donc rechercher des alliages qui soient simultanément et durs et plastiques.

« On voit, d'après cela, dit M. Charpy, à quels essais on pourra procéder pour examiner un alliage pour coussinets; la plasticité pourra être définie par un essai à la compression; elle devra être suffisante pour permettre au coussinet de se mouler sur l'arbre et ne pas dépasser une certaine limite pour que le coussinet ne se déforme pas d'une façon continue sous l'influence de la charge qu'il doit supporter; l'essai de compression permettra de voir en même temps si l'alliage est brisant, ce qui serait un grave défaut. »

La nature des constituants sera définie par l'examen microscopique; la constitution spéciale des alliages pour pièces frottantes correspond à un caractère micrographique très net: en polissant ces alliages sur un support élastique, on devra creuser les parties molles et laisser les parties dures en relief; les alliages pour coussinets doivent donc avoir une texture qui devient visible par simple polissage. Des essais d'usure et de frottement devront servir à caractériser le rôle des constituants durs.

Pour étudier la résistance à la compression, on employait des éprouvettes à section carrée de 10 millimètres de côté et 15 millimètres de hauteur. Le métal était coulé dans une petite lingotière spéciale en bronze formée de deux parties réunies par un collier et présentant une section carrée de 10 millimètres de côté sur 60 centimètres de hauteur. On utilisait seulement la partie inférieure des lingots ainsi obtenus. On sciait à la partie inférieure une plaquette destinée à l'examen micrographique et aux essais d'usure, et on prenait au-dessus l'éprouvette de compression.

Cette éprouvette de compression était ensuite soumise à une pression graduellement croissante en enregistrant, à chaque instant, l'écrasement produit, amplifié dans le rapport de 10 à 1.

Nous devons ajouter que, depuis l'étude de M. Charpy, les recherches sur le frottement et l'usure se sont développées, et quelques machines ont été créées, facilitant les essais. Nous citerons celle du Conservatoire des Arts et Métiers.

Cette machine est destinée surtout à l'essai des huiles. Néanmoins, elle peut être employée pour l'essai des métaux au frottement, en utilisant toujours la même huile.

Elle comprend, d'après la description qu'en a donné M. Breuil, dans le numéro du 12 septembre 1903, du *Génie civil*, un arbre creux tournant dans deux paliers robustes supportés par une colonne en fonte; sur la fusée de cet arbre est placée une boîte portant deux coussinets en bronze; cette boîte est prolongée par un pendule gradué sur lequel coulisse un poids. Lorsqu'on essaie une huile, on la fait couler entre les coussi-

nets et la fusée. Lorsqu'on met celle-ci en mouvement, il y a une déviation de la boîte d'autant plus grande que l'huile est plus visqueuse. — En enregistrant la déviation du pendule, on peut connaître l'effet de frottement qui occasionne cette déviation; c'est bien la disposition du frein de Prony.

On peut faire varier la pression sur le lubrificateur par une tige qui s'appuie sur le coussinet supérieur et qui est plus ou moins pressée sur lui au moyen d'une vis s'emmanchant dans la tête du pendule. On mesure la pression exercée au moyen d'un manomètre à eau, sur la boîte duquel vient s'appuyer la tige de pression par l'intermédiaire d'un diaphragme. On peut, enfin, refroidir ou réchauffer le bout de la fusée et l'arbre de transmission qui sont creux.

Pour l'essai des métaux au frottement, on utilise une tête pendulaire qui est analogue à celle décrite. Les métaux, se présentant sous la forme de trois coussinets, sont logés dans la boîte. On fait les mêmes déterminations que celles indiquées, mais en utilisant la même huile.

Les essais à la compression ont montré que, pour les alliages plomb-antimoine, la résistance à la compression augmente d'abord rapidement avec la proportion d'antimoine, varie très peu quand la proportion d'antimoine va de 10 à 30 0/0 environ et augmente ensuite régulièrement. Ceci est en concordance absolue avec l'étude théorique. — La résistance des alliages riches en plomb est proportionnelle à la teneur en eutectique. Au-delà de 10 0/0 d'antimoine, pourcentage qui correspond à l'eutectique, on rencontre de l'antimoine libre. Tant que les cristaux d'antimoine ne sont pas assez nombreux pour se toucher, ils ne font que transmettre la pression à l'eutectique. Quand la teneur en antimoine dépasse 30 0/0, les cristaux se touchent et la résistance augmente. Puis, quand la charge est assez élevée, le métal se désagrège avec une brusquerie d'autant plus grande que la quantité d'antimoine est plus importante.

Quant à l'usure, elle augmente régulièrement avec la proportion d'antimoine; M. Charpy en conclut que cette usure se

produit probablement par éclatement et clivage des grains durs.

De ces recherches il résulte que seuls les alliages renfermant de 15 à 25 0/0 d'antimoine environ peuvent être employés comme antifrictions. Ceux qui renferment moins de 15 0/0 d'antimoine sont trop mous et, par conséquent, peuvent amener facilement le grippement. Ceux qui renferment plus de 25 0/0 sont trop fragiles.

En somme, les conclusions auxquelles a été conduit M. Charpy, pour les alliages antimoine-plomb, vont se retrouver dans l'étude des autres alliages ; tous les bons alliages antifrictions devront renfermer des grains durs enveloppés dans un eutectique doux.

Les grains durs auront pour rôle de diminuer le frottement et la tendance au grippement ; ils ne devront pas être en proportion assez grande pour rendre le métal fragile. L'eutectique devra avoir une constitution telle qu'il joue bien en quelque sorte le rôle de matelas ; ceci dépendra essentiellement de la composition du métal.

Nous avons déjà dit que les principaux alliages de plomb et d'antimoine employés comme antifrictions étaient les suivants :

Pb.................	94 0/0
Sb.................	6 0/0

cité par Dudley. Serait mou d'après les conclusions de M. Charpy ;

Pb.................	88 0/0
Sb.................	12 0/0

cité également par Dudley. Serait encore un peu trop mou ;

Pb.................	85 0/0
Sb.................	15 0/0

Cet alliage, cité par Hiorns et Dudley, correspond bien au type défini ci-dessus.

Il en est de même du suivant donné par Ledebur et employé pour coussinets de wagon :

Pb	84
Sb	16

Dean a donné comme formule du Magnolia (Voir Hiorns, p. 239) :

Pb	78
Sb	21
Fe	1

Mais Dudley avait donné comme analyse d'un produit désigné sous le même nom :

Pb	83,55
Sb	16,45

Alliages plomb-étain-bismuth. — M. Charpy n'a pas fait d'essais à la compression ou à l'usure sur ces alliages.

Ils sont d'ailleurs très peu employés comme antifrictions, à cause principalement du prix du bismuth.

Ils correspondent cependant très bien aux désidérata exprimés plus haut.

Ce que nous avons dit sur leur constitution le fait comprendre.

Alliages plomb-étain-antimoine. — Les alliages de plomb, d'étain et d'antimoine sont peut-être les plus employés.

M. Charpy a montré que l'antimoine a pour effet d'augmenter considérablement la résistance à la compression des alliages étain-plomb. L'influence de l'antimoine à ce point de vue est à peu près constante, quelle que soit la teneur en plomb de l'alliage, à moins que cependant le pourcentage ne soit très élevé.

D'autre part, il faut, pour éviter toute fragilité, que l'alliage ne contienne pas plus de 15 à 18 0/0 d'antimoine. Pour avoir simultanément une grande résistance, il faut que la teneur en étain soit comprise entre 10 et 50 0/0.

Comme l'étain est beaucoup plus coûteux que le plomb, il y a, comme le fait très justement remarquer M. Charpy, grand avantage à utiliser les alliages riches en plomb.

L'étain intervient dans l'alliage, d'une part, pour diminuer la dureté et, par conséquent, la fragilité des grains durs; d'autre part, pour augmenter la résistance à la compression de l'eutectique.

Et il faut conclure à la grande supériorité des alliages étain-plomb-antimoine sur les alliages plomb-antimoine.

Les principaux alliages de plomb-étain-antimoine utilisés comme antifrictions sont :

Pb	80
Sn	5
Sb	15 + un peu de bismuth

cité par M. Guillemin;

Pb	80
Sn	12
Sb	8

utilisé par la Compagnie de l'Est pour des garnitures métalliques;

Pb	77,7
Sn	5,9
Sb	16,8

(trop faible teneur en étain), cité par Thurston ;

Pb	76
Sn	14
Sb	10

utilisé par la Compagnie d'Orléans et celle de Paris-Lyon-Méditerranée, pour garnitures métalliques;

Pb	73
Sn	12
Sb	15

utilisé par la Compagnie du Nord pour garnitures métalliques de tiges de piston et par les Chemins de fer de l'État Français comme garnitures des colliers d'excentriques;

Pb	68
Sn	15
Sb	17

est sur la limite de la fragilité; cité par Dudley, comme vendu sous le nom bizarre de métal-graphite, sans doute parce que le graphite, ou mieux, la plombagine est utilisée comme matière de graissage;

Pb	60
Sn	20
Sb	20

doit être fragile; donné par Ledebur comme employé pour coussinets de chemins de fer;

Pb	42
Sn	46
Sb	12

métal de Hoyles, cité par Hiorns;

Pb	42
Sn	42
Sb	16

employé par les Chemins de fer de l'État Français; on ne sau-

rait lui reprocher que sa haute teneur en étain, et cela purement au point de vue prix de revient;

Pb	40
Sn	45
Sb	15

donné par Ledebur:

Pb	37
Sn	38
Sb	25

utilisé par les Compagnies de Chemins de fer italiens.

Alliages plomb-cuivre-antimoine. — M. Charpy, dans ses intéressants essais, a démontré qu'une addition de cuivre aux alliages renfermant moins de 13 0/0 d'antimoine diminue sensiblement la résistance à la compression. D'autre part, le cuivre, ajouté aux alliages renfermant de 15 à 25 0/0 d'antimoine, élève sensiblement leur résistance à la compression.

Le principal type utilisé est :

Cu	10
Pb	65
Sb	25

D'après les recherches de M. Charpy, cet alliage aurait une plus grande résistance à la compression que s'il ne contenait pas de cuivre.

Il est utilisé par la Compagnie de l'Est pour les coussinets de locomotives et tenders.

Alliages étain-cuivre-antimoine. — L'étude de ces alliages, d'ailleurs incomplète, a donné à M. Charpy des résultats peu nets. Il pense cependant que l'un des alliages les

meilleurs et les plus résistants à la compression a pour composition :

Sn.................	85 0/0
Sb...............	12 0/0
Cu.................	3 0/0 environ.

Voici les principaux alliages usités, en partant des plus riches en étain :

ÉTAIN	CUIVRE	ANTIMOINE	RÉFÉRENCES
96	4	8	Cité par Thurston. Coussinets ordinaires.
90	2	8	Cité par Thurston. Cité par Hiorns pour coussinets fortement chargés, employés dans les chemins de fer russes pour coussinets de wagons.
88,8	3,7	7,4	Cité par Thurston et Bolley comme métal de Karmarsch. Employé en France pour les constructions navales.
87,5	12,5	»	Cité par Thurston. Métal de Karmarsch.
87	6	7	Cité par Hiorns pour coussinets fortement chargés.
85	5	10	Cité par Ledebur et Hiorns comme métal de Jacoby pour faibles pressions.
83,33	5,55	11,11	Employé pour coussinets de wagons. Compagnies de l'Est, P.-L.-M., Ouest, etc.
83	6	11	Cité par Ledebur. Employé par les Chemins de fer de Berlin.
82	6	12	Cité par Ledebur. Employé par les chemins de fer d'Orléans et de l'Ouest autrichien.
82	8	10	Coussinets de têtes de bielles et colliers d'excentriques. Compagnie du Nord.
81,25	6,25	12,5	Cité par Thurston et Bolley.
81	5	14	Cité par Hiorns pour coussinets très durs.
80	10	10	Cité par Thurston. Employé par les chemins de fer suisses.
79	»	21	Cité par Hiorns.
78,5	10	11,5	Employé par les chemins de fer russes. Cité par Thurston.
76,7	7,8	15,5	Cité par Ledebur et Thurston, comme alliage anglais.
76	7	17	Cité par Hiorns pour coussinets faiblement chargés.
75	»	25	Métal de Karmarsch. Cité par Thurston et Bolley.
73	9	18	Cité par Thurston et Hiorns, pour faibles pressions.
72,8	9	18,2	Cité par Ledebur.
72	2	26	Cité par Thurston et Bolley.
71,4	21,4	7,2	Cité par Thurston, métal de Karmarsch.
71	5	24	Standard White, métal de Thurston. Employé par la Compagnie P.-L.-M. pour garnitures de colliers d'excentriques et de tiroirs.
70,73	9,75	19,5	Cité par Thurston.
67	22	11	Cité par Thurston. Employé par le Great Western Railway (Angleterre). Correspondant au métal de Babbit.
67	11	22	Paliers de crosses de piston. Chemins de fer de l'Etat Français.
33,3	22,2	44,5	Cité par Hiorns. Métal de Dewrance pour locomotives.
14	4	82	Cité par Hiorns pour coussinets très durs.

Alliages zinc-étain-antimoine. — M. Charpy a montré que les alliages de zinc, d'étain et d'antimoine sont très ré-

sistants à la compression et que l'étain diminue nettement la fragilité des alliages zinc-antimoine.

Ces alliages sont très peu utilisés.

Autres alliages ternaires. — On utilise quelquefois des alliages ternaires, autres que ceux que nous venons d'étudier ; nous citerons les alliages de cuivre, de zinc et d'antimoine et aussi ceux de cuivre, d'étain et de zinc.

Nous donnerons les deux types suivants :

Cu	5
Zn	85
Sb	10

cité par Ledebur, et :

Cu	55,73
Sn	0,97
Zn	42,67
Fe	0,68

qui constitue le bronze Harrington. En réalité, cet alliage est un laiton à teneur en cuivre un peu plus faible que les laitons ordinaires de décolletage.

Autres antifrictions. — On utilise souvent comme alliages antifrictions des produits beaucoup plus complexes que ceux que nous avons envisagés jusqu'ici et plus particulièrement des alliages de cuivre, d'étain, de plomb et de zinc ; de cuivre, d'étain, de plomb et d'antimoine, et aussi de cuivre, d'étain, de plomb, de zinc et d'antimoine.

Nous citerons quelques types de ces alliages, utilisés comme coussinets de machines (Ledebur).

1°	Cu	75
	Sn	8
	Pb	8
	Zn	9
2°	Cu	74
	Sn	9,5
	Pb	7
	Zn	9,5

utilisés pour des coussinets de locomotives (Thurston et Ledebur);

Cu	70,20
Sn	4,25
Pb	14,75
Zn	10,20
Fe	0,55

formant le métal Camélia (Dudley);

Cu	59
Sn	2,16
Pb	0,31
Zn	38,40
Fe	0,11

constituant le métal Tobin (Dudley); c'est un véritable laiton à l'étain;

Cu	5,6
Sn	17,5
Pb	20,7
Zn	56,2

utilisés pour les machines marines;

Cu	4,01
Sn	9,91
Pb	1,15
Zn	85,57

d'après Dudley et cité par Salye;

Cu	5
Sn	32
Pb	60
Sb	3

employé par la Compagnie de l'Ouest pour la garniture de tiges de piston et d'excentriques;

Cu	4
Sn	73
Pb	7
Sb	12
Phosphure de cuivre	4

Cu	2
Sn	52
Pb	30
Sb	16

cité par M. Guillemin, employé par la Compagnie de l'Ouest, pour la fabrication des coussinets et des colliers d'excentriques;

Cu	2,3
Sn	7,6
Pb	3,3
Zn	83,3
Sb	3,5

bronze blanc, dit de Beugnot, utilisé par les constructions navales françaises;

Cu	4
Sn	19
Pb	5
Zn	69
Sb	3

cité par divers auteurs.

On remarquera combien il y a de formules complexes dans celles que nous venons d'énoncer.

De plus, on trouvera, à plusieurs reprises, des compositions très différentes, désignées sous le même nom fantaisiste; cela provient de ce que très souvent les usines ont été conduites à modifier leur mélange, soit en vue de diminuer le prix de revient, soit pour améliorer certaines propriétés de l'alliage, tout en conservant la même marque industrielle.

D'autre part, il arrive fort souvent que le même nom désigne plusieurs alliages dont les applications sont différentes. Nous donnons dans l'*Album de métallographie* les microstructures de trois alliages *Tandem* (Phot. 354, 355 et 635) et de deux alliages Synovia (Phot. 359 à 362).

Discussion générale des propriétés des métaux utilisés dans le frottement. — « Les métaux blancs, disait M. Nozo,

ingénieur de la Compagnie du Nord, dans le *Bulletin de la Société des Ingénieurs civils* de 1852, soit pour coussinets complets, soit pour doublage, peuvent être utilisés avantageusement dans les frottements à très petites vitesses de certaines machines, ou dans le cas de faibles charges et de moyennes vitesses; mais ils ne conviennent pas aux appareils roulants des chemins de fer, dans lesquels la charge et la vitesse atteignent des conditions qui poussent à une usure rapide, tout métal n'étant pas doué d'une résistance assez grande pour résister à des frottements énergiques. »

Cette opinion a été démontrée fausse dans la suite et, aujourd'hui, les antifrictions sont extrêmement employés. — Nous citerons, d'ailleurs, avec M. Charpy, l'opinion de deux savants ingénieurs qui se sont plus particulièrement occupés de la question.

Voici, tout d'abord, ce que dit M. Salomon, ingénieur en chef du matériel et de la traction de la Compagnie des Chemins de fer de l'Est (*Bulletin de la Commission internationale du Congrès des Chemins de fer*, 1896) :

« Les coussinets pour voitures de la Compagnie de l'Est sont en métal blanc, composé de 83,33 parties d'étain, 11,11 parties d'antimoine et 5,55 parties de cuivre.

L'usure des coussinets en métal blanc est extrêmement lente. Depuis 1885, origine de l'application de ces coussinets à la Compagnie de l'Est, la réforme de ces organes n'a jamais eu lieu par suite de leur usure en épaisseur; elle n'a encore été provoquée que par l'accroissement du jeu longitudinal ou par des causes accidentelles.

D'après des essais effectués sur des voitures de 1re classe, des coussinets en métal blanc pesant 7^{kg},560, présentant une surface de portée de 184^{cm},92 et chargés à raison de 15 à 18 kilogrammes par centimètre carré perdent en moyenne par usure 26^{gr},198 pour un parcours de 100.000 kilomètres.

En 1885, on a adopté, à la Compagnie de l'Est : 1° l'huile minérale russe pour les coussinets ; 2° le métal blanc pour la confection de ces coussinets. Pendant les années 1886, 1887,

1888, période que l'on peut considérer comme transitoire, il y a eu des chauffages relativement nombreux, probablement à cause de l'inexpérience des agents dans l'emploi de l'huile minérale et dans le travail du métal blanc, mais surtout parce que le graissage à l'huile minérale exige, pour donner des résultats satisfaisants, l'emploi simultané du métal blanc. On constate, en effet, que des boîtes d'un même type (sans tampon graisseur et dans lesquelles la fusée est baignée dans l'huile) ont chauffé, en 1893, 27 fois moins avec des coussinets en métal blanc qu'avec des coussinets en bronze, et les boîtes à tampon graisseur environ 2 fois moins. Ces réductions du nombre des chauffages, pour un même type de boîtes résultant de la substitution du métal blanc au bronze, sont assez variables d'une année à l'autre; mais les statistiques ont toujours accusé un avantage considérable pour le métal blanc. »

D'autre part, M. Chabal, ingénieur en chef adjoint du matériel et de la traction de la Compagnie Paris-Lyon-Méditerranée, a publié, en 1894, dans la *Revue générale des chemins de fer*, les résultats d'expériences effectuées sur ces alliages. Cette étude avait pour titre : *Note sur l'influence de la nature de l'huile de graissage et du métal des coussinets sur la résistance au roulement des wagons.*

Les essais portaient comparativement sur des coussinets en bronze à 82 0/0 de cuivre, 16 0/0 d'étain et 2 0/0 de zinc, et des coussinets en métal blanc à 83,33 0/0 d'étain, 11,11 0/0 d'antimoine et 5,55 0/0 de cuivre, graissés soit à l'huile minérale, soit à l'huile de colza.

Parmi les remarques faites par M. Chabal, nous citerons les suivantes :

« Les coussinets en métal blanc chauffent beaucoup moins que les coussinets en bronze.

« Aux vitesses de 30 à 40 kilomètres, les coussinets en métal blanc donnent une résistance moindre que les coussinets en bronze. La substitution du métal blanc au bronze donne une diminution de 20 0/0 sur la résistance pour des wagons houillers à pleine charge formant des trains de 300 tonnes et

roulant à des vitesses de 27 à 42 kilomètres à l'heure. D'après les essais faits sur véhicules isolés, on trouve que le gain que donne cette substitution diminue quand la vitesse croît, surtout si ces véhicules sont chargés pour la petite vitesse, et peut même, dans ce dernier cas, devenir une perte aux grandes vitesses, mais que, pour ces véhicules chargés pour la grande vitesse, le gain reste toujours d'au moins 5 0/0, ce qui implique un gain plus marqué pour le cas de véhicules roulant dans un train.

« L'usure des coussinets régulés est beaucoup moindre que celle des coussinets en bronze (0,4 en moyenne). »

Mais ces recherches n'avaient porté que sur un nombre relativement restreint d'alliages, lorsque M. Charpy étudia, de la façon la plus scientifique, les conditions que devaient remplir ces produits métallurgiques.

Nous avons résumé ses importantes recherches; nous reproduisons ici ses conclusions :

« En résumé, les alliages employés comme antifrictions présentent tous le même caractère général; ils sont formés par des grains durs englobés dans un alliage plastique. Cette constitution, qui se rencontre dans presque tous les alliages auxquels on est arrivé empiriquement à donner la préférence, répond aux deux conditions que l'on peut chercher à réaliser dans les alliages pour coussinets; la portée se fait sur les grains durs, qui ont un coefficient de frottement peu élevé et sur lesquels le grippement ne peut se produire que très difficilement; la plasticité du ciment permet au coussinet de se mouler sur l'arbre.

Cette constitution peut se réaliser par des mélanges binaires; les grains durs étant constitués soit par un métal simple, comme l'antimoine, soit par un composé défini, comme l'antimoniure d'étain, l'antimoniure de cuivre, le stannure de cuivre. Il sera préférable en général de recourir à des mélanges ternaires dans lesquels, grâce à la composition complexe du ciment, il sera plus facile de trouver une composition qui corresponde aux différentes qualités requises. L'étude de la

constitution des alliages ternaires donne pour cette recherche de précieuses indications. Elle permet de se rendre compte, par un petit nombre d'essais, des limites entre lesquelles on peut faire varier la composition pour avoir des alliages utilisables.

« Les essais à faire sont principalement des essais micrographiques pour vérifier que l'alliage présente bien la constitution qui a été indiquée plus haut et des essais de compression pour s'assurer que l'alliage n'est ni trop dur, ni trop mou, qu'il s'écrase régulièrement et ne se brise pas en fragments sous l'influence de la pression.

« Ces considérations permettent un premier classement des alliages utilisables ; celles qui interviennent ensuite sont relatives principalement au prix de revient, aux facilités de travail et d'emploi et échappent, par conséquent, aux recherches de laboratoire.

« Après avoir indiqué les principes de l'étude des alliages pour coussinets, nous avons examiné les groupes ternaires suivants : cuivre, étain, antimoine; plomb, étain, antimoine ; cuivre, plomb, antimoine; zinc, étain, antimoine; cuivre, étain, plomb, et indiqué, dans quelques cas, les principales combinaisons utilisables, à 3 ou 4 0/0 près. Toute précision plus grande nous paraît actuellement illusoire : on a d'ailleurs ainsi un choix suffisant, et il semble inutile de recourir aux formules plus compliquées, qui ont parfois été proposées, qui comportent l'emploi de quatre et même cinq métaux différents et dont la fixation paraît avoir été complètement arbitraire. »

Depuis que l'étude de M. Charpy a paru, de nouveaux alliages ont été préconisés, notamment, les bronzes à très haute teneur en plomb dont nous avons parlé précédemment, et qui renferment un peu de nickel.

Un mémoire a été publié récemment ; il embrasse, au point de vue pratique, tous ces métaux ; aussi nous en voudrions-nous de ne pas en reproduire les principaux passages.

Il est dû à M. G.-H. Clamer et a été publié dans le *Journal*

of the Franklin Institute (CLVI, 49 à 77; 1903) et résumé dans la *Revue de Métallurgie* de mars 1904.

Il est facile de se rendre compte que, pour les coussinets, il n'y a guère que cinq métaux auxquels on puisse songer : le cuivre, l'étain, le plomb, le zinc et l'antimoine. Les autres corps que l'on peut y introduire n'y figurent qu'en petites quantités et d'une façon accessoire. Les alliages, aujourd'hui employés pour les coussinets, sont divisés en deux groupes bien tranchés : les alliages blancs et les bronzes.

Dans cette étude on s'est occupé surtout des coussinets de chemins de fer, mais la plupart des conclusions peuvent s'étendre à des usages tout autres.

Les conditions élémentaires à faire entrer en ligne de compte pour faire choix d'un alliage pour coussinets sont les suivantes :

1° Composition ;
2° Structure ;
3° Frottement ;
4° Échauffement ;
5° Usure des coussinets ;
6° Usure du tourillon ;
7° Résistance à la compression ;
8° Prix de revient.

Il est impossible de trouver un alliage qui satisfasse à la perfection à chacune des conditions précédentes. Ainsi les métaux qui donnent la plus faible usure sont aussi ceux qui présentent le plus fort coefficient de frottement.

Il faut donc faire intervenir simultanément une série de données contradictoires, et le choix à faire entre elles reste toujours un peu arbitraire.

1° *Composition.* — La composition ne présenterait aucune importance s'il était possible d'atteindre la perfection dans l'ajustage mécanique d'un coussinet ; dans ce cas, en effet, il n'y aurait jamais de contact de métal sur métal, mais seulement de métal avec l'huile, et l'usure résulterait seulement du frottement du fluide contre le solide ; mais ce résultat est impossible à obtenir, surtout dans les chemins de fer, où les

arrêts, les renversements du sens du mouvement, les déplacements latéraux modifient constamment les positions relatives des pièces frottantes.

Cette composition intervient pour déterminer en partie les différentes autres conditions qui ont été précédemment énoncées. On est obligé de réunir dans une certaine mesure l'étude de ces différents points de vue.

2° *Structure.* — La structure dépend dans une grande mesure de la composition chimique, mais elle varie encore avec le traitement calorifique et certains procédés de traitement qui modifient les dimensions des cristaux. D'une façon générale, l'expérience a montré que tous les alliages pour coussinets satisfaisants renferment au moins deux éléments structuraux différents : un élément dur capable de supporter la charge voulue, un élément mou servant de support plastique aux grains plus durs. En général, plus les surfaces en contact sont dures, plus le coefficient de frottement est faible, et plus forte est la pression à laquelle se produit le grippement.

On peut, d'après cela, être tenté de croire que plus dur est un alliage, meilleur il sera. Cette idée a été le point de départ de l'usage, si général au temps passé, du bronze, mais le bon fonctionnement d'un semblable alliage dépend avant tout de la perfection de son ajustage.

Pour obtenir un ajustage convenable dans la mise en service, M. Hopkins a proposé depuis bien des années déjà d'employer un garnissage en plomb. L'usage en est devenu tout à fait général aux États-Unis ; mais, bien que l'on obtienne ainsi une assiette convenable pour le tourillon, l'ajustage est constamment déréglé, et il faut que le coussinet lui-même ait une certaine plasticité pour éviter les chauffages anormaux.

L'introduction du plomb dans l'alliage de cuivre et d'étain a donné d'excellents résultats, comme on l'indiquera plus loin.

3° *Coefficient de frottement.* — D'une façon générale, plus le métal est dur, plus le coefficient de frottement est faible.

Les bronzes ont un coefficient beaucoup plus faible que les métaux blancs ; mais, par contre, plus le métal est dur, plus il a une tendance à chauffer, parce que, en raison de son défaut de plasticité, la répartition de la pression se fait inégalement, et en certains points une pression trop forte amenant en contact les surfaces métalliques donne lieu au grippage et au chauffage.

4° *Échauffement.* — L'échauffement normal est également à prendre en considération ; la consommation de l'huile va en croissant avec la température; mais en même temps le coefficient de frottement diminue, pourvu, bien entendu, que le coussinet soit dans un état normal.

5° *Usure du coussinet.* — Il existe une relation très remarquable entre l'usure et la composition d'un coussinet, et c'est là un champ de recherches qui est bien loin d'être exploré complètement. On emploie fréquemment des compositions très coûteuses et présentant peu de résistance à l'usure, bien inférieure à des alliages beaucoup moins chers. Cela tient à ce que l'on a encore très peu de chiffres précis sur cette question.

6° *Usure du tourillon.* — La composition du coussinet a une influence très marquée sur l'usure du tourillon. Les métaux mous amènent une usure plus rapide des tourillons; mais la cause de ce fait n'est pas connue. Peut-être cela tient-il à la fixation de grains de sable dans l'alliage, peut-être à une action directe du métal lui-même.

7° *Résistance à la compression.* — Les essais de résistance à la compression des alliages pour coussinets sont importants pour montrer :

1° Si l'alliage est assez dur pour supporter sans déformation sa charge normale;

2° Si l'alliage est brisant et sautera en éclats sous l'action d'efforts exagérés ;

3° S'il est suffisamment plastique pour qu'il puisse se déformer dans des circonstances de travail difficile.

On passera en revue les différents alliages en examinant successivement les points de vue résumés précédemment.

Plomb et antimoine. — Ces alliages sont de plus en plus durs

à mesure que la proportion d'antimoine augmente. L'alliage eutectique correspond à une proportion de 13 0/0. Au-delà de cette teneur, on voit apparaître des cristaux de première consolidation d'antimoine.

La Pensylvania Railroad C°, sur le conseil du Dr Dudley, son chimiste, a adopté l'alliage à 13 0/0 d'antimoine pour le garnissage de ses coussinets et obtenu les meilleurs résultats. Les expériences de l'auteur montrent que le plomb est de tous les métaux celui qui est le plus favorable pour empêcher l'usure.

A mesure que la proportion d'antimoine augmente, la dureté et la fragilité de l'alliage augmentent et aussi son usure; par contre, le frottement diminue et en même temps la température normale de fonctionnement des coussinets; mais les chauffages accidentels se produisent plus facilement; au contraire, l'usure des tourillons diminue à mesure que la dureté augmente. Ces alliages sont, de tous, les moins coûteux, et ils conviennent parfaitement dans un grand nombre de circonstances lorsque les efforts à demander aux coussinets ne sont pas exagérés. C'est une folie commune à un grand nombre d'établissements industriels d'employer des matières d'une valeur tout à fait disproportionnée à l'usage auquel elles sont destinées.

Plomb, antimoine et étain. — L'alliage de plomb et d'antimoine n'est pas suffisamment résistant pour supporter de fortes pressions; l'addition d'étain augmente beaucoup sa rigidité et sa dureté, sans cependant le rendre plus fragile, comme le ferait un accroissement de la proportion d'antimoine. Cet alliage renferme le composé SbSn en petits cristaux d'apparence cubique. Son prix, bien entendu, va en croissant avec la proportion d'étain; il convient très bien pour les usages auxquels on applique les métaux antifriction.

Étain et antimoine. — Ces alliages sont peu employés pour les coussinets, à cause de leur prix élevé. Leur usage le plus important est la fabrication des sièges de soupape.

Étain, antimoine et cuivre. — Un alliage de ces métaux est connu sous le nom de *Parfait Babbitt*, du nom de son inventeur Isaac Babbitt, qui a eu, le premier, l'idée d'employer pour la confection des coussinets les alliages fusibles. La formule qu'il a recommandée et qui est encore employée aujourd'hui est la suivante :

Étain	89,1 0/0
Antimoine	7,4
Cuivre	3,7

C'est le plus coûteux de tous les alliages à coussinets.

Étain, antimoine, plomb et cuivre. — Ces alliages s'obtiennent en ajoutant du plomb au métal *babbitt.* Un grand nombre de consommateurs protesteraient énergiquement s'ils trouvaient, à l'analyse, du plomb dans leur *babbitt*, et pourtant cela l'améliore, tout en en diminuant le prix, pourvu cependant que la proportion de plomb reste peu élevée.

Alliages de zinc. — On a souvent proposé des alliages avec le zinc, mais ils n'ont jamais donné de bons résultats. Le zinc, en effet, adhère au fer dès qu'il y a un léger échauffement et galvanise en quelque sorte le tourillon.

Bronzes. — Les expériences de frottement faites par Clamer ont principalement porté sur les bronzes. Les expériences étaient faites sur de petits axes en acier que l'on pesait avec précision avant et après l'expérience. La perte de poids par usure était perceptible après un nombre de révolutions variant de 100.000 à 500.000. Dans toutes ces expériences on a déterminé les pertes de poids, le coefficient de frottement et la température moyenne du coussinet.

Les conditions ont été les suivantes :

Nombre total de tours	100.000
Tours par minute	525
Dimensions du tourillon	0m,095 de diamètre
— —	0m,088 de longueur
Pression sur 1 millimètre carré	0kg,703
Graissage	Galena coach oil.

MÉTAL EMPLOYÉ	COMPOSITION	FROTTEMENT	ÉCHAUFFEMENT	USURE
Bronze	15 0/0 Sn	1,3 0/0	10°	0gr,28
—	10 0/0 Sn	1,3 0/0	10°,5	0,177
—	5 0/0 Sn	1,4 0/0	11°	0,08

Ces chiffres donnent la démonstration bien nette d'un fait énoncé, en 1892, par Dudley, dans un mémoire lu devant le Franklin Institute, que le degré d'usure diminue avec la proportion d'étain. M. Dudley montra à la même époque que l'introduction du plomb dans les bronzes avait de grands avantages et son usage est aujourd'hui tout à fait général.

L'usure est diminuée, la fréquence des échauffements anormaux est réduite ; l'expérience pratique l'a surabondamment démontré.

Voici les résultats des expériences faites sur le même sujet par l'auteur :

COMPOSITION		ÉCHAUFFEMENT		
ÉTAIN	PLOMB	FROTTEMENT	TEMPÉRATURE	USURE
Pour 100	Pour 100			
5	5	1,6	11°,6	0,034
5	10	1,8	13°,3	0,031
5	15	1,8	14°,4	0,033
5	20	1,8	14°,4	0,027
5	25	1,8	14°,4	0,020
5	30	1,8	17°,7	0,013

On voit donc que l'accroissement du plomb diminue très notablement l'usure. On ne peut pas diminuer l'étain au-dessous de 5 0/0, parce qu'alors le plomb cesse d'être miscible à l'alliage, et il se produit une liquation qui donne une masse hétérogène. L'augmentation de l'étain présente généralement des

inconvénients. Dans le cas des alliages riches en plomb, il est nécessaire, pour avoir une répartition convenable du plomb, de refroidir très brusquement l'alliage. On peut tourner cette difficulté en ajoutant à l'alliage un métal peu fusible, comme le nickel, qui amorce le début de la solidification à une température déjà très élevée.

L'auteur conclut, comme résumé, de ses études, que l'alliage le plus convenable pour coussinets de chemins de fer a la composition suivante :

Cuivre.............	64 0/0
Étain...............	5 0/0
Plomb.............	30 0/0
Nickel.............	1 0/0

Depuis trois ans, cet alliage, connu dans le commerce sous le nom de « bronze plastique », a été employé sur une large échelle. Sa consommation a pu être de 2.000.000 de kilogrammes ; il se fond aussi facilement que le bronze ordinaire, se travaille généralement bien ; il a pu être obtenu en pièces moulées variant de 500 grammes à 500 kilogrammes l'une.

Enfin, l'auteur donne quelques résultats relatifs à l'introduction du zinc dans ces alliages. L'usure croît très rapidement avec la proportion du zinc, comme le montre le tableau suivant :

COMPOSITION				USURE
Cu	Sn	Pb	Zn	
Pour 100	Pour 100	Pour 100	Pour 100	
85,1	4,6	10,6	0	0,038
82,3	5,3	10,2	2,1	0,041
79,8	4,7	10,3	5,4	0,047
77,4	5,6	11,4	6,5	0,047
74,3	4,7	10,6	11	0,085

Nous apprécierons autant que faire se peut la très intéressante conclusion du remarquable travail de M. Clamer : à savoir, l'emploi de ce bronze spécial à très haute teneur en plomb et renfermant un peu de nickel.

Nous en avons déjà parlé en détail au chapitre des *Bronzes spéciaux;* mais nous ne saurions trop insister sur l'intérêt que présente son application. Il résoud assurément la question si délicate du métal à coussinets, bagues, etc... ; les très nombreuses expériences que nous avons faites sur ce sujet le démontrent pleinement. Il commence, d'ailleurs, à être très utilisé et très répandu, dans les chemins de fer, dans les constructions automobiles, dans les constructions maritimes, etc.

Ses qualités peuvent se résumer ainsi :

Prix de revient faible;

Utilisation très aisée;

Homogénéité assez grande;

Résistance parfaite à l'usure;

Résistance à l'écrasement assez élevée;

Point de fusion élevé, aux environs de 850°, qualités que n'offrent pas la plupart des antifrictions.

CONCLUSIONS

D'après ce que nous venons d'exposer et les importantes recherches de M. Charpy, un antifriction doit être constitué par des grains durs englobés dans un alliage plastique.

Les grains durs peuvent être constitués soit par un métal isolé (antimoine, bismuth), soit par une combinaison de métaux dont les types les plus fréquents dans les antifrictions industriels sont le composé SbSn et le composé $SnCu^3$.

La partie plastique de l'alliage est ordinairement formée par un eutectique ou certains métaux libres, tels que le plomb.

Il est à noter cependant que certains alliages employés correspondent sensiblement à un eutectique, tel par exemple :

Pb	80
Sb	8
Sn	12

utilisé par la Compagnie de l'Est.

Ils ne remplissent donc pas les conditions énoncées par M. Charpy.

De plus, il est à noter qu'il y a une relation directe entre le nombre de grains durs et la résistance du produit à l'usure et au choc ; il y a donc ici encore une relation directe entre l'utilisation et la structure de l'alliage.

TYPES DE CAHIERS DES CHARGES POUR LES ANTIFRICTIONS

ADMINISTRATION DE LA MARINE

ANTIFRICTIONS	CUIVRE	ÉTAIN	ZINC	ANTIM.	PLOMB
Bronze Bugniot ou métal blanc....	2,3	7,6	83,3	3,3	3,5

CHEMINS DE FER DE L'ÉTAT

	QUANTITÉS DE MÉTAUX DIVERS POUR 100 D'ALLIAGES		
	Cuivre rouge	Étain	Antimoine
Métal Antifriction Wohler..........	5,55	83,33	11,11

CHEMINS DE FER DU NORD

NUMÉROS	CUIVRE	ÉTAIN	ANTIM.	
7	8	82	10	Métal blanc pour doubler les coussinets des locomotives, bagues, coussinets, tête de bielle; colliers et garnitures de colliers d'excentriques.
	5,5	83,4	11,1	Coussinets de voitures et wagons, métal blanc pour doubler les coussinets de voitures.
	PLOMB	ÉTAIN	ANTIM.	
6	73	12	15	Métal blanc pour garnitures de tiges.

La proportion de matières étrangères ne devra jamais dépasser les 0,02 du poids total.

La proportion de cuivre ne devra pas varier de plus de 0,01 en plus ou en moins de la proportion indiquée.

CHEMINS DE FER DE PARIS A LYON ET A LA MÉDITERRANÉE

NUMÉROS du TITRE	COMPOSITION				APPLICATIONS
	CUIVRE	ÉTAIN	PLOMB	ANTIMOINE	
1	»	10	70	20	Garnitures d'intérieur des coussinets de bielles, des colliers d'excentriques, des bandes de tiroirs de distribution de locomotives.
2	5,555	83,333	»	11,111	Garnitures des coussinets de boîtes à huile de locomotives, tenders, voitures et wagons.
3[1]	»	25,6	70,4	4	Garniture pour joints d'autoclave.
4	»	14	76	10	Garniture Duterne pour tiges de pistons de tiroirs et de régulateurs.

1. Les ateliers et dépôts de la Compagnie, qui ont à leur disposition du métal pour garnitures Duterne, emploient, pour les garnitures pour joints d'autoclaves, la composition suivante :

Métal pour garnitures Duterne, titre n° 4	40
Plomb	40
Etain	20

CHEMINS DE FER DU MIDI

1° Pour le garnissage des coussinets le métal blanc numéro 3 de la composition suivante :

Cuivre.....	4 à 5 0/0
Étain.......	10,20 à 11,70 0/0
Antimoine..	11,30 à 12,80 0/0
Plomb.....	72 à 74 0/0

2° Pour le garnissage des tiroirs de distribution, le métal blanc numéro 1 de la composition suivante :

Cuivre...............	5,555
Etain................	83,333
Antimoine...........	11,111

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE XIX

Breuil, *Génie civil*, 12 septembre 1903 (*Machines à essayer au frottement*).

Charpy, *Contribution à l'étude des alliages métalliques*, p. 203 (*Étude générale*).

Chabal, *Revue générale des Chemins de fer*, 1894 (*Essais pratiques*).

Clamer, *Journal of the Franklin Institute*, CLVI, p. 49 à 77, 1903 (*Id.*).

Dudley, *Revue générale des Chemins de fer*, juin 1893 (*Essais*).

Guillemin, *Commission des méthodes d'essais*, 1894 (*Id.*).

Hiorns, *les Alliages métalliques* (traduction Boudouard), Steinheil. 1900 (*Généralités*).

Knab, *Traité des Alliages métalliques*, Steinheil (*Id.*).

Mozo, *Bulletin de la Société des Ingénieurs civils*, 1852 (*Essais pratiques*).

Salomon, *Bulletin de la Commission internationale du Congrès des Chemins de fer*, 1896 (*Id.*).

Thurston, *Étude sur le frottement, le graissage et les lubrifiants*, Bernard-Tignol, éditeur (*Généralités*).

CHAPITRE XX

ALLIAGES DE NICKEL

Les principaux alliages de nickel sont :

Les aciers au nickel, au nickel et au chrome, etc., que nous avons étudiés au chapitre IV ;

Les alliages nickel-cuivre ;

Les alliages nickel-cuivre-zinc ;

Les alliages nickel-étain.

Les alliages nickel-zinc, nickel-plomb, etc., n'ont pas été étudiés théoriquement et ne présentent pas d'intérêt industriel.

ALLIAGES DE NICKEL ET DE CUIVRE ET ALLIAGES DE NICKEL, DE CUIVRE, DE ZINC OU MAILLECHORTS

Étude théorique. — COURBE DE FUSIBILITÉ. — La courbe de fusibilité des alliages cuivre-nickel a été déterminée par M. H. Gautier (*fig.* 200). Elle présente deux branches qui sont séparées par un point anguleux. Celui-ci correspond à un alliage fusible à 1.340°.

Aucune détermination n'a été faite sur la fusibilité des alliages ternaires nickel-cuivre-zinc.

MÉTALLOGRAPHIE (Album, Pl. XCIV à XCVI, Phot. 368

à 377). — Peu de recherches ont été faites au point de vue micrographique sur les alliages nickel-cuivre.

Dans son livre sur *la Métallographie* (traduction Bazin), Hiorns donne quelques résultats qu'il a obtenus sur ces alliages. Voici comment il s'exprime à ce sujet :

« Un alliage à 12 0/0 de nickel, 60 0/0 de cuivre et 28 0/0 de zinc obtenu au creuset et coulé en lingot, fut attaqué par l'acide chlorhydrique ; on y remarque de très légers indices de grains polygonaux. L'intérieur est constitué par un très fin réseau de lignes brillantes non continues qui ressemblent à un grand nombre de brins espacés les uns des autres par une substance noire ; mais, quand on fait usage d'un faible grossissement, les lignes paraissent être continues et donnent l'impression de deux corps différents tendant à cristalliser ensemble et à s'interposer l'un et l'autre. En certains endroits, le dessin est constitué par des rangées de branches se ramifiant avec d'autres à angle droit. Dans son ensemble, la surface est parfaitement uniforme, et l'enchevêtrement des figures

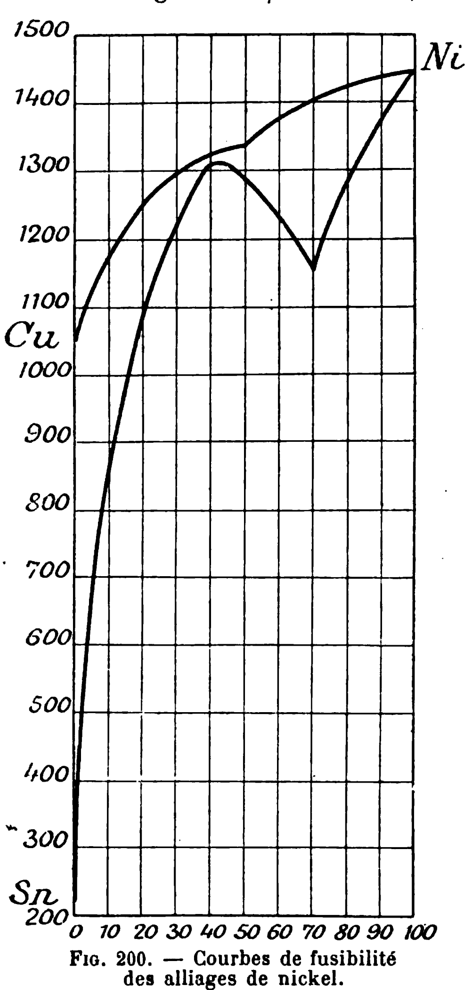


Fig. 200. — Courbes de fusibilité des alliages de nickel.

donne l'impression d'un métal ayant une résistance considérable. L'ensemble de la masse est très fin et paraît être constitué par un mélange eutectique de cuivre et d'un alliage de cuivre et de zinc. Si cela est, le nickel allié, probablement au cuivre, forme le réseau brillant auquel nous avons déjà fait allusion. »

« Un autre alliage renfermant 4 0/0 de nickel en plus que l'alliage précédent a présenté la même structure. »

D'autre part, Hiorns a étudié une série d'alliages contenant 50 0/0 de cuivre et dans lesquels le zinc remplace de plus en plus le nickel.

La teneur en zinc va de 30 à 38 0/0; celle de nickel, de 20 à 12.

On trouve toujours une structure arborescente; mais les grains sont plus grands et distribués sur l'ensemble en un grand nombre de corps analogues à la fougère. Ces alliages semblent formés par une pâte non cristalline enchâssée dans la pâte d'un eutectique granuleux, et Hiorns conclut que l'on a trois corps bien distincts :

« Les dendrites proéminents que nous considérons comme formés par un alliage de cuivre et de nickel, l'eutectique de cuivre et de l'alliage cuivre et zinc et les lignes de démarcation, qui sont probablement d'une composition chimique analogue à $CuZn^2$. »

Les autres alliages possèdent les mêmes caractères.

On voit que ces données, bien que présentant quelque intérêt, ne forment pas l'ensemble des matériaux nécessaires pour fixer la constitution de ces alliages.

Behrens a indiqué que les alliages cuivre-nickel se rapprochent beaucoup comme microstructure des alliages cuivre-manganèse. Il a également indiqué que l'alliage renfermant 55 0/0 de cuivre, 20 0/0 de nickel et 25 0/0 de zinc présente des dendrites qui rappellent la structure du bronze à 15 0/0 d'étain et l'alliage à 58 0/0 de cuivre, 12 0/0 de nickel, et 30 0/0 de zinc donnent absolument la structure du laiton à 20 0/0 de zinc.

Nous donnons (Pl. XCIV, Phot. 373) la micrographie d'un alliage dont la composition est :

Cu	59,68
Pb	0,81
Ni	18,59
Zn	20,82
Fe	0,40

On y remarque des polyèdres très nettement formés, qui, comme la ferrite, sont diversement colorés. Ces polyèdres semblent être l'indice d'une solution solide. Cette microstructure est identique à celle des alliages cuivre-aluminium à très haute teneur en cuivre (Cu > 92 0/0).

Un autre alliage (Phot. 372) :

Cu	58
Ni	18
Zn	24

a donné une micrographie qui se rapproche énormément de celle d'un bronze. On doit se trouver en présence de deux solutions solides.

En résumé, il semble bien que le cuivre et le nickel ne forment pas de combinaisons définies ; quant aux alliages ternaires cuivre-nickel-zinc, ils ont été fort peu étudiés [1].

Résistance électrique. — On a trouvé un maximum de résistivité pour l'alliage cuivre-nickel à 40 0/0 de nickel.

Étude industrielle. — Fabrication. — Les alliages de cuivre et de nickel, et surtout ceux de cuivre, de nickel et de zinc ont une importance industrielle telle que nous devons entrer dans quelques détails relatifs à leur fabrication, à leurs propriétés et à leur utilisation.

Les alliages de nickel et de cuivre sont connus sous le nom de bronze de nickel.

Deux méthodes étaient autrefois utilisées dans la fabrication

1. Nous venons d'entreprendre l'étude détaillée des alliages cuivre-nickel ; nous en donnons les premiers résultats à l'*Appendice*.

des maillechorts : la méthode anglaise, la méthode allemande; nous les résumerons très rapidement.

La méthode anglaise consistait à fondre tout le nickel en présence d'une partie du cuivre et du zinc qui devaient être utilisés, en prenant les précautions nécessaires contre l'oxydation. Lorsque cet alliage était bien fondu, on y introduisait en quantité convenable un alliage de cuivre et de zinc que l'on avait préparé à part et qui renfermait ordinairement 67 de zinc et 33 de cuivre. Puis, le nouvel alliage étant bien mélangé, on ajoutait la quantité de zinc qui rentrait encore dans la composition, le cuivre ayant été complètement incorporé précédemment.

On ne s'explique pas très bien la pratique de cette opération et l'utilisation d'un alliage zinc-cuivre pour incorporer une partie de zinc. Si cette façon d'agir a pour but d'éviter l'évaporation du zinc, il paraîtrait plus logique d'utiliser le laiton du commerce, dont certains déchets, planches, tubes, sont suffisamment purs.

Empressons-nous d'ailleurs d'ajouter que cette méthode, comme la suivante, est complètement abandonnée.

Dans le procédé allemand, on avait d'un côté tout le cuivre qui devait entrer dans l'alliage, d'un autre côté le nickel et le zinc mélangés et partagés en trois parties égales. Au fond du creuset dans lequel devait avoir lieu la fusion, on plaçait une couche de cuivre; au dessus, une couche du mélange nickel-zinc, et on continuait jusqu'à ce que le premier tiers de ce mélange se trouvât dans le lit de fusion. Après avoir recouvert le charbon de bois pilé, on portait au four.

Lorsque l'alliage était fondu, on le mélangeait avec soin, et l'on ajoutait la deuxième portion du mélange nickel-zinc, dont on attendait la fusion pour faire l'addition finale.

Le procédé actuellement employé est tout autre : on prépare tout d'abord un alliage binaire cuivre-nickel et on lui ajoute le zinc sous forme de laiton. Remarquons d'ailleurs que la plupart du temps on ne se donne pas la peine d'employer des métaux neufs et qu'on utilise purement et simplement des déchets

d'alliages de cuivre et de nickel que l'on trouve dans le commerce. Sous ce rapport l'industrie du maillechort a subi les mêmes perfectionnements que la fabrication du laiton, et à l'heure actuelle il se fait bien peu de maillechort en partant de nickel, de cuivre et de zinc. Cependant on part encore des métaux purs, dans les fabrications très soignées, notamment les couverts et les vaisselles.

Les alliages nickel-cuivre sont obtenus souvent, en partant de métaux neufs ou, du moins, en ne faisant entrer dans le mélange à fondre qu'une faible proportion de déchets, comme dans la fabrication de la planche de laiton.

La coulée des alliages de nickel est soumise, bien entendu, aux précautions générales que nous avons indiquées au premier chapitre de ce livre. Toutefois, il faut bien faire remarquer que le maillechort produit aisément en se solidifiant de gros cristaux. Aussi est-il nécessaire de ne pas utiliser les lingotières trop chaudes pour la fabrication des barres destinées au laminage, sans quoi l'on aurait un métal trop fragile. Si d'ailleurs on est conduit par une fabrication trop intense à produire des lingots fragiles, il sera facile de faire disparaître ce défaut par un recuit dans des conditions convenables.

Au point de vue de la fabrication, il faut distinguer le maillechort pour moulage et le maillechort pour laminage, étirage, etc. Il n'y a rien de particulier à signaler pour le moulage du maillechort. Quant aux lingots destinés au traitement mécanique, ils sont coulés dans des lingotières semblables à celles du laiton. Pour les barreaux ou les profilés, on utilise les lingotières pour laminage à froid. Pour les planches, on utilise des lingotières ayant intérieurement de $0^m,40$ à $0^m,50$ sur $0^m,10$ à $0^m,12$ et une épaisseur de 25 à 40 millimètres. Le laminage du maillechort se fait *à froid* avec recuits successifs, comme pour le laiton; il n'y a rien de particulier à signaler à ce sujet, si ce n'est, nous le répétons, la fragilité du métal non recuit. On peut laminer aisément les alliages cuivre-nickel renfermant jusqu'à 50 0/0 de nickel; pratiquement, on ne lamine que les alliages renfermant 25 à 30 0/0 de nickel; ceux con-

tenant plus de 50 0/0 de nickel présentent de grosses difficultés si les métaux ne sont pas très purs. Mais on peut ajouter que tous les alliages cuivre-nickel peuvent être laminés à froid; quelques-uns avec difficulté. On sait que le nickel, lui-même, n'est pas des plus aisés à laminer, lorsqu'il n'est pas pur.

On pratique en Allemagne, le découpage des planches par scie hélicoïdale pour obtenir des rubans destinés au tréfilage, comme pour les laitons.

Pendant longtemps on a cru que le recuit devait se faire au bois. La plupart des usines existantes utilisent aujourd'hui des fours à charbon à flamme directe. Cependant pour la fabrication des couverts on recuit généralement en caisse et au milieu de charbon de bois.

Avant l'étirage, on pratique un décapage. La seule précaution à prendre dans l'étirage consiste à tremper la barre dans de la cire jaune ou dans l'huile qui sert de matière graissante.

Il nous reste maintenant à indiquer les principaux types d'alliages de cuivre et de nickel et de maillechorts.

Comme alliage de cuivre et de nickel, les types les plus usités sont :

Cu....................	88
Ni....................	12
Cu....................	80
Ni....................	20
Cu....................	75
Ni....................	25

Nous en verrons plus loin les emplois.

Le tableau suivant donne la composition des principaux maillechorts utilisés ; certaines de ces formules sont données par Hiorns.

COMPOSITION CENTÉSIMALE					
CUIVRE	NICKEL	COBALT	ZINC	FER	PLOMB
40,4	31,6	»	25,4	2,6	»
50,0	31,2	»	18,8	»	»
53,3	26,6	»	20,1	»	»
51,6	26,0	»	22,4	»	»
51,6	25,8	»	22,6	»	»
48,5	24,3	»	24,3	»	2,9
56,98	24,3	»	18,72	»	»
59,0	22,2	»	18,5	»	0,3
55,2	21,4	»	23,4	»	»
59,1	20,2	»	20,4	0,3	»
56,5	20,3	»	23,2	»	»
67,0	19,3	»	13,6	»	»
63,34	19,13	»	17,41	»	»
50,0	18,75	»	31,2	»	»
58,0	18,5	»	23,5	»	»
60,0	18,8	3,4	17,8	»	»
58,3	19,4	»	19,4	»	2,9
53,1	16,25	»	29,98	0,67	»
55,62	15,72	»	28,66	»	»
56,84	15,62	»	27,24	0,30	»
62,4	15,05	»	22,15	trace	»
57,8	14,3	»	27,1	»	0,8
58,72	13,85	»	26,43	1,0	»
57,0	13,4	»	27,6	2,0	»
57,4	13,0	»	26,6	3,0	»
55,4	11,64	»	31,38	1,58	»
62,63	10,85	»	26,52	»	»
59,1	9,7	»	31,2	»	»
66,0	8,2	»	25,3	0,5	»
63	6,0	»	31,0	»	»

Le maillechort le plus commun de décolletage est celui renfermant 6 0/0 de nickel; il contient généralement 2 à 3 0/0 de plomb et 60 0/0 à 62 0/0 de cuivre, le reste étant du zinc.

L'alliage à 10 et 12 0/0 de nickel est très usité aussi. La composition est déterminée par la teinte que l'on veut avoir. On peut dire que le maximum de blancheur, dans les cupro-nickels, comme dans les maillechorts est obtenu pour Ni = 20 environ.

Généralement les maillechorts pour décolletage renferment 2 à 3 0/0 de plomb pour faciliter le travail.

Pour les moulages, on utilise spécialement l'alliage Cu = 60, Ni = 20 ; Zn = 20.

Mais cet alliage a un prix de revient très élevé, de par la grande quantité de nickel qu'il renferme.

Les alliages cuivre-zinc-nickel sont utilisés pour la propre soudure des maillechorts. Le principal type employé dans ce but est :

Cu	47
Ni	11
Zn	42

On a préconisé aussi :

Cu	38
Ni	12
Zn	50

Propriétés des alliages de cuivre et de nickel. — Le nickel ajouté au cuivre lui donne une dureté remarquable.

Jusqu'à 15 0/0 de nickel, ces alliages conservent un reflet rosé. A une dose plus élevée, ils possèdent une belle couleur blanche qui atteint son maximum pour l'alliage renfermant environ

Cu	57
Ni	23

Mais cet alliage est extrêmement dur et difficile à travailler. Il n'est pas du tout malléable.

Pour les teneurs de :

Cu	75
Ni	25

on n'a plus une couleur bien blanche; on aperçoit nettement un reflet jaunâtre.

Les propriétés ont été étudiées d'une façon peu précise; on connaît cependant celles de l'alliage :

Cu	80
Ni	20

qui donne :

Brut de coulée:

R	28 à 31
A 0/0	25 à 35 0/0

Laminé à froid :

R..............	60
A 0/0...........	3 à 4

Recuit:

R...............	33 à 41
A 0/0...........	32 à 39

(Voir à l'*Appendice* l'étude que nous avons ébauchée sur ces alliages.)

Propriétés des maillechorts. — Étant donnée la complexité relative des maillechorts, on possède peu de renseignements précis sur les propriétés de ces alliages.

Hiorns chercha à déterminer les meilleures proportions de cuivre et de zinc pour les alliages renfermant 8, 10, 12, 16 et 20 0/0 de nickel.

Voici, d'ailleurs, comment il décrit lui-même ses expériences dans son livre sur *les Alliages métalliques :*

« Le cuivre et le nickel étaient fondus ensemble sous une couche de charbon de bois, et un peu de borax était ajouté comme flux.

Le zinc était additionné lorsque les métaux précédents étaient bien fondus et le tout était agité avec une baguette en bois, avant de verser le métal dans un moule en fer.

On employait les métaux commerciaux ordinaires.

ALLIAGES CONTENANT 8 0/0 DE NICKEL

	I	II	III	IV
Cuivre...........................	58	60	62	64
Nickel...........................	8	8	8	8
Zinc.............................	34	32	30	28

Le numéro I était le plus blanc, mais le plus faible; il se laminait le plus mal. Le numéro II était plus blanc que les

numéros III et IV; c'était le plus tenace des quatre; un lingot de 6 millimètres d'épaisseur fut courbé en deux dans un étau sans craquer. Il se laminait bien, mais n'était pas aussi malléable que les numéros III et IV. Les numéros III et IV se laminaient également bien, mais le numéro III était le plus blanc.

ALLIAGES CONTENANT ENVIRON 12 0/0 DE NICKEL

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Cuivre...	57,5	57,5	57	55	58,0	57,0	56,0	55,0	56,0	55,0	54,0	53,0
Nickel...	12,5	12,5	12	12	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
Zinc.....	30,0	28,0	31	31	29,5	30,5	31,5	32,5	29,5	30,5	31,5	32,5
Fer	»	2,0	»	2	»	»	»	»	»	»	»	»
Étain....	»	»	»	»	»	»	»	»	2,0	2,0	2,0	2,0

Pour la malléabilité, ils se rangent dans l'ordre suivant, le premier étant le plus malléable : IV, III, VI, II, I, V, VII, VIII, IX, X, XI, XII. Le numéro IV se lamine non seulement le mieux, sans craquer sur les côtés, mais il est aussi le plus blanc en couleur. Tous les lingots étaient numérotés et passés successivement sous le laminoir; ils avaient tous la même épaisseur dès le début. L'état de chacun d'eux était noté après chaque opération, et leur épaisseur était mesurée. Ils étaient tous recuits ensemble dans les mêmes conditions. Les six premiers (IV, III, VI, II, I, V) se laminaient bien, les numéros I et V étant identiques à ce point de vue. Les numéros VII et VIII se laminaient assez bien; les derniers se laminaient mal, les plaques de métal se fendaient par le milieu avant d'atteindre l'épaisseur requise. Pour ces essais de laminage, l'auteur s'est adressé à M. Whilson et à MM. Kemp et C°, à Birmingham.

Les résultats ci-dessus peuvent être résumés de la façon suivante : de 30 à 31 0/0 de zinc avec une quantité de cuivre

inférieure ou double, excellents résultats quant à la malléabilité et à la blancheur : 32 0/0 de zinc rendent l'alliage plus cassant, et il faut alors recuire plus souvent pendant le laminage; 1 à 2 0/0 de fer peuvent être ajoutés sans modifier sérieusement la malléabilité, les alliages étant plus durs et plus blancs; l'étain est très mauvais et communique une teinte jaune à l'alliage; 2 0/0 rendent le travail impossible.

ALLIAGES CONTENANT 16 0/0 DE NICKEL

	I	II	III	IV	V
Cuivre..................	62	60	58	56	54
Nickel..................	16	16	16	16	16
Zinc....................	22	24	26	28	30

Le numéro V était plus blanc et se comportait admirablement bien pendant le laminage. Les numéros III et IV, identiques quant à la malléabilité, se laminaient mieux que le numéro II et étaient plus blancs. Le numéro I était le plus mauvais de la série aussi bien pour la malléabilité que pour la couleur. Une plus haute proportion de zinc avec 16 0/0 de nickel serait probablement défectueuse. Il est à remarquer ici que de meilleurs résultats étaient obtenus avec 30 0/0 de zinc, comme dans les alliages à 12 0/0 de nickel, mais avec un moindre pourcentage en cuivre.

ALLIAGES CONTENANT 20 0/0 DE NICKEL

	I	II	III	IV	V
Cuivre..................	60	58	56	54	50
Nickel..................	20	20	20	20	20
Zinc....................	20	22	24	26	30

Le numéro I se laminait mal; mais la coulée n'était pas saine, ayant été faite trop chaude, ce qui avait pu altérer sa malléabilité. Le numéro II se laminait bien, quoique légèrement craquelé sur les côtés. Le numéro IV se laminait remarquablement bien avec un mince biseau. Le numéro V se comporte sensiblement comme le numéro III, mais il est plus blanc en couleur. De ces expériences il semble que la proportion de 30 0/0 de zinc avec 20 0/0 de nickel est plutôt forte; probablement qu'avec 28 0/0 on conserverait les avantages de la blancheur et de la malléabilité au plus haut degré. »

Il est à noter qu'au début le maillechort avait pour composition :

Cu	50,00
Zn	31,25
Ni	18,75

UTILISATIONS DES ALLIAGES CUIVRE-NICKEL. — Ces alliages sont utilisés en feuilles pour la préparation des enveloppes de balles de fusil de petit calibre, pour la confection de réflecteurs, etc.

On emploie alors l'alliage :

Cu	80
Zn	20

ou l'alliage:

Cu	75
Zn	25

utilisé notamment par la Compagnie Paris-Lyon-Méditerranée.

Ces alliages se laminent et s'emboutissent à froid. On cherche aussi à les utiliser comme plaques de foyers de locomotives. La Compagnie Française des Métaux en a montré d'importants spécimens à l'Exposition de 1889.

A l'Exposition de Liège 1905, il y en avait aussi de fort intéressants. D'ailleurs des essais dans cette voie sont poursuivis actuellement aux Compagnies du Midi et de P.-L.-M.

Pour la fabrication des monnaies, on emploie le plus souvent l'alliage :

Cu	75
Ni	25

C'est la monnaie adoptée, en 1870, par l'Allemagne.

Les États-Unis ont le titre

Cu	88
Ni	12 avec un peu d'antimoine

Mais la plupart des nations ont préféré utiliser les alliages ternaires cuivre-nickel-zinc ou le nickel commercialement pur (France).

Pour la fabrication des ustensiles de cuisine où ces alliages remplacent souvent le nickel pur, on utilise le même produit que pour les monnaies.

L'alliage

Cu	60
Ni	40

forme le *constantan*, utilisé comme résistance électrique.

Les alliages cuivre-nickel sont évidemment moins répandus dans l'industrie que les alliages cuivre-zinc-nickel, dont le prix est beaucoup moins élevé.

Utilisations des maillechorts. — Les maillechorts, fabriqués depuis de longs siècles par les Chinois, sont désignés dans l'industrie sous un grand nombre de noms, argentan, pack-fong, qui signifie cuivre blanc, nickel-argent, alfénide, argiroïde, silvéroïde, argent Névada, etc.

Le nom de maillechort est dû au premier industriel nommé Maillet, qui introduisit cet alliage d'Allemagne en France, en 1719. Ce n'est qu'en 1824 que l'on sut préparer industriellement ces alliages, et ce n'est qu'en 1850 que la fabrication prit du développement.

L'emploi des maillechorts est basé sur leur inaltérabilité. C'est là leur grande supériorité sur beaucoup d'alliages.

Leurs principales utilisations sont :

A. La fabrication d'objets pour usages domestiques, notamment cuillers, fourchettes, vaisselles, et aussi d'objets de bijouterie et orfèvrerie fausses, d'objets de Paris, etc., voire même

de petites pièces mécaniques, notamment d'engrenages de compteurs devant séjourner dans l'eau ;

B. La préparation des barres destinées au décolletage (vis, écrous, etc.) ou de feuilles destinées à l'estampage ;

C. La fabrication des monnaies.

Nous passerons rapidement ces applications en revue.

A. *Alliages pour la fabrication d'objets pour usages domestiques.* — Les alliages utilisés à cet effet sont assez variables. et beaucoup de formules se retrouvent dans le tableau relatif à la composition des maillechorts que nous avons donné plus haut.

Il faut, toutefois, retenir les compositions suivantes particulièrement usitées en France :

Premier alliage :

Cu....................	60
Ni....................	20
Zn....................	20

Deuxième alliage :

Cu....................	55
Ni....................	20
Zn....................	25

Troisième alliage :

Cu....................	50
Ni....................	25
Zn....................	25

C'est le premier alliage qui est le plus usité pour la fabrication des couverts de table, des tasses, de la vaisselle, des chandeliers, etc.

En Allemagne, on utilise :

Cu....................	50
Ni....................	18,7
Zn....................	31,3

qui se rapproche beaucoup des précédents.

Pour les moulages, on utilise surtout les alliages suivants :

1°	Cu	48,5
	Ni	24,3
	Zn	24,3
	Pb	2,9
2°	Cu	54,5
	Ni	20,8
	Zn	21,8
	Pb	2,9
3°	Cu	58,3
	Ni	19,4
	Zn	19,4
	Pb	2,9
4°	Cu	57,8
	Ni	14,3
	Zn	27,1
	Pb	2,8
5°	Cu	57,0
	Ni	20,0
	Zn	20,0
	Pb	3

On voit que ces alliages renferment du plomb qui rend plus facile le travail mécanique aussi bien que le moulage.

On peut dire, nous le répétons, qu'il est absolument illusoire, lorsqu'on ne cherche que la couleur, d'augmenter la teneur de nickel au-delà de 20 0/0.

L'*Alfénide* (du nom de Halphen, manufacturier qui travaillait pour la maison Christophle et C[ie], contient peu de nickel; il est aisé à recouvrir d'une couche d'argent par voie galvanoplastique. Il a comme composition moyenne de cet alliage :

Cu	60
Ni	10
Zn	30

B. *Alliages destinés à la fabrication des barres ou des*

planches. — La composition des alliages destinés à la fabrication des barres est très différente, nous l'avons déjà dit, suivant la teinte que l'on veut avoir.

L'un des meilleurs est le type suivant :

Cu....................	60
Ni....................	20
Zn....................	20

Mais généralement on se tient à une teneur de nickel inférieure, et on ajoute du plomb qui facilite le décolletage, comme pour le laiton.

Le maillechort le plus commun de décolletage renferme, nous l'avons déjà dit, 6 à 8 0/0 de nickel.

On est obligé d'augmenter la teneur lorsqu'on veut obtenir une couleur plus blanche.

Pour la planche, l'une des compositions les plus usitées est :

Cu....................	50
Ni....................	18
Zn....................	32

C. *Alliages pour monnaies.* — Nous avons vu que certains pays employaient la monnaie cuivre-nickel. D'autres utilisent de véritables maillechorts.

Nous citerons la Belgique qui a adopté l'alliage :

Cu....................	75
Ni....................	20
Zn....................	15

et le Chili, dont le type monétaire en nickel, émis en 1872, correspondait à :

Cu....................	20
Ni....................	20
Zn....................	10

Enfin, la Suisse a émis, en 1850, des pièces dont la composition était :

Cu	50
Ni	10
Zn	25
Ag	15

Maillechorts complexes. — Les fabricants ont essayé d'améliorer le maillechort ordinaire en lui faisant subir plusieurs additions. Nous ne saurions décrire tous les essais faits.

Il faut, tout d'abord, citer, comme genre de maillechorts, les fameux alliages de Ruolz, qui ont eu en orfèvrerie un si grand succès ; ils sont obtenus, en somme, en remplaçant le zinc par de l'argent.

Leurs compositions varient dans les limites suivantes :

Cu	35 à 50
Ni	25 à 30
Ag	20 à 30

Les lingots coulés sont généralement très cristallins et fragiles. Il faut leur faire subir un recuit en atmosphère réductrice pour les utiliser et les rendre malléables.

Il arrive fort souvent que le maillechort renferme du fer, jusqu'à 2 à 3 0/0 et même de l'étain.

Voici l'analyse d'un métal qui a quelque succès sous le nom d'*argental* dans l'ornementation :

Cu	55
Ni	23
Zn	17
Fe	3
Sn	2

Le *platinoïde* est un maillechort qui a pris naissance à Sheffield et qui renferme 1 à 2 0/0 de tungstène. L'inventeur, M. Martins, dit que l'introduction du tungstène a lieu sous forme de phosphure et qu'une fois l'addition faite on soumet l'alliage à des fusions répétées, afin d'éliminer le phosphore et

de laisser le tungstène en solution dans le cuivre. L'inventeur assure que ce métal possède des propriétés remarquables et que, notamment, il a une résistance électrique égale à une fois et demie celle du maillechort.

La composition la plus ordinaire est :

Cu	60
Zn	25
Ni	14
W	1

Il faut encore citer, comme maillechorts complexes, ceux au bismuth ; les trois combinaisons données par Krupp sont (la composition n'est pas centésimale) :

1°	Cu	45
	Ni	32,5
	Bi	1
	Sn	16
	Zn	21,5
2°	Cu	69
	Ni	10
	Bi	1
	Sn	15
	Zn	20
	Al	1
3°	Cu	47
	Ni	30,9
	Bi	0,1
	Sn	1
	Zn	21

Dans les maillechorts complexes, on peut encore faire rentrer l'*arguzoïde* utilisé pour les œuvres d'art et formé de :

Cu	56
Zn	23
Ni	13
Sn	4
Pb	4

On doit aussi citer quelques maillechorts renfermant de l'étain et du cobalt, du cadmium, etc. Voici quelques types de ces produits dont les propriétés ne semblent pas avoir été particulièrement étudiées. Ils sont toutefois, ou ont été, un peu employés dans la joaillerie bon marché : broches, agrafes, épingles, etc...

Alliage Parisien :

Cu	69
Ni	19
Zn	6
Co	6

Alliage de Clark :

Cu	75
Ni	14,5
Zn	7,5
Sn	1,5
Co	1,5

Alliage de Baudouin :

Cu	72
Ni	17
Co	1,5
Sn	2,5
Zn	7

Alliage blanc de Stake :

Cu	89
Ni	9
Sb	2

Maillechort à l'aluminium :

Cu	90 à 60
Ni	10 à 40
Al	0,175 à 0,05

Cet alliage n'est, en somme, qu'un cupro-nickel épuré à l'aluminium.

Maillechorts au magnésium :

Cu	90 à 75
Ni	10 à 25
Mg	1 à 2

Ces alliages au magnésium sont fort intéressants, même au point de vue industriel et sont fort usités, surtout en Allemagne. — Le magnésium joue le rôle d'un épurateur extrêmement énergique. Il faut noter, d'ailleurs, que l'on fait aussi de véritables maillechorts, c'est-à-dire des alliages cuivre-zinc-nickel, qui renferment des traces de magnésium.

M. Ponthière a fait, sur quelques maillechorts complexes, des expériences assez intéressantes ; avec un alliage ayant la composition suivante :

Cu	31,3
Ni	66,66
Al	1,53
Si	0,17

il a obtenu :

R	74
A 0/0	33

mais l'état du métal n'est pas indiqué.

Avec un autre alliage correspondant à

Cu	33,33
Ni	63,33
Al	3,00
Si	0,33

l'essai à la traction lui a donné :

R	64 à 80
A 0/0	1 à 3

De ces essais, M. Ponthière déduisait que ces deux alliages

pourraient donner d'excellents résultats dans la fabrication des canons. Comme le prix de revient serait trop élevé, M. Ponthière a proposé de remplacer le nickel par le manganèse. Enfin il a étudié l'alliage suivant :

Cu...................	57,00
Ni...................	20,00
Zn...................	20,00
Al + Si..............	3,00

et il a obtenu :

R............	65 à 72 kilogrammes
A 0/0........	1 à 2 —

Il nous a paru bon de rappeler ces essais, bien qu'ils ne présentent que peu d'intérêt industriel ou scientifique, du moins à l'heure actuelle.

Il faut encore citer l'existence de ferro-maillechorts obtenus en remplaçant le nickel par du ferro-nickel.

Ces alliages sont très employés pour la confection des résistances électriques.

Voici, d'ailleurs, d'après Feussner et Snideck, la composition de quelques-uns de ces alliages et leurs résistances spécifiques :

NOMS	COMPOSITION					RÉSISTANCE SPÉCIFIQUE
	Cu	Zn	Ni	Fe	Mn	
Cuivre pur...............	100	»	»	»	»	1,6
Nickel pur...............	»	»	100	»	»	12,6
Bronze de nickel.........	75	»	25	»	»	34,2
Argent allemand.........	60,1	25,4	14	0,3	»	30,00
Rhéotan..................	50,4	16,9	25,3	4,5	»	52,50
Nickeline d'Obermaïer I...	61,6	19,7	18,5	0,2	0,18	33,20
— II..	54,6	20,4	24,5	0,6	0,27	44,80
Alliage spécial I..........	74,4	0,2	25,1	0,4	0,13	34,20
— II.........	74,7	0,5	25,1	0,7	0,17	32,80
— III.........	72	»	3	»	28,80	47,70

ALLIAGES D'ÉTAIN ET DE NICKEL

Étude théorique. — COURBE DE FUSIBILITÉ. — Cette courbe (*fig.* 200) présente un maximum qui correspond à peu près à l'alliage Ni^2Sn (le maximum est à environ 45 de nickel, tandis que Ni^2Sn correspond à 50 0/0 Ni).

La courbe présente deux eutectiques, l'un extrêmement voisin de l'étain pur (environ 0,1 0/0 de nickel, l'autre correspondant à 70 0/0 de nickel).

Le premier de ces eutectiques fond à 231°, l'autre à 1.160°.

MÉTALLOGRAPHIE (Album, Pl. XCVI, Phot. 378 et 379). — L'étude micrographique vient absolument confirmer les résultats de la courbe de fusibilité.

Si l'on ajoute du nickel à l'étain pur, on trouve tout d'abord des cristaux de la combinaison nickel-étain, qui vont en se développant au fur et à mesure que le nickel augmente, ainsi que le prouvent les deux micrographies, l'une d'un alliage à 10 0/0 de nickel, l'autre d'un alliage à 40 0/0 de nickel.

Au-delà de 10 0/0 de nickel, on trouve des dendrites de nickel entourées d'un eutectique qui doit être formé par le nickel et la combinaison nickel-étain.

Nous donnons plusieurs micrographies de ces alliages (Phot. 374 et 375).

Ces alliages ne sont guère utilisés dans l'industrie. Il faut toutefois signaler l'*alliage de Warne*, jadis employé en joaillerie et qui a la composition bizarre :

Sn	37
Ni	26
Bi	26
Co	11

AUTRES ALLIAGES DE NICKEL

Les autres alliages de nickel n'ont donné lieu à aucune étude théorique.

Tuputti a bien signalé que le plomb et le nickel peuvent donner un alliage gris feuilleté; mais cette étude n'a pas été reprise depuis 1811.

A signaler au point de vue industriel :

L'alliage nickel-zinc à 10 0/0 de nickel utilisé à l'état de poudre dans la peinture et les impressions argentées;

Un alliage nickel-plomb-antimoine, obtenu en partant des caractères d'imprimerie ordinaires et destiné au même usage :

Métal d'imprimerie(?)....	100
Ni	5

L'alliage vendu sous le nom de *néogène*, qui a pour composition :

Cu	58,0
Zn....................	27,0
Ni....................	12,0
Al....................	6,5
Sn....................	2,0
Bi....................	0,5

C'est un maillechort à relativement haute teneur en aluminium.

La *nickeline*, brevetée par M. Guillemin (3 *juillet* 1878), contient du nickel, de l'étain, du zinc, du cuivre et du *sodium*, celui-ci étant introduit sous forme d'alliage ternaire, zinc-étain-sodium, obtenu par fusion. Cet alliage de sodium, dont le but est évidemment l'affinage, peut être aussi employé pour les bronzes. D'après le brevet de M. Guillemin, on peut utiliser les quatre compositions suivantes :

Na...............	3	2	2	2
Sn...............	3	3,5	2	2
Zn...............	8	7	8	3

Ces alliages avaient reçu le nom de *chimic metal.*

La nickeline peut varier de composition :

Cu	25,0	25,0	25,0	25,0
Ni	53,5	58,0	61,0	63,3
Zn	19,5	14,8	11,6	8,3
Sn	1,7	1,8	2,0	3,0
Na	0,3	0,4	0,4	0,4

Enfin nous devons ajouter que l'on fait, par réduction d'un mélange d'oxyde par le charbon et en présence de cuivre, des alliages cuivre-nickel-vanadium et cuivre-cobalt-vanadium. Ils ne paraissent pas avoir trouvé d'importants débouchés.

CONCLUSIONS

Il est fort difficile, dans l'état actuel de l'étude théorique des alliages de nickel, de montrer la relation qui peut exister entre les propriétés et l'utilisation de ces produits.

Ce que l'on peut dire des alliages nickel-cuivre, c'est que ceux que livre l'industrie semblent être formés d'une solution, dont les propriétés varient graduellement avec la composition de cette solution.

On ne sait que bien peu de choses sur les maillechorts, qui paraissent être constitués aussi de solutions solides.

Il y a de ce côté beaucoup de recherches à faire, et cela sur un domaine entièrement industriel.

TYPES DE CAHIERS DES CHARGES POUR LES MAILLECHORTS

CHEMINS DE FER DE PARIS A LYON ET A LA MÉDITERRANÉE

NUMÉRO du TITRE	COMPOSITION			APPLICATIONS MAILLECHORTS	TOLÉRANCES PAR RAPPORT AU POIDS TOTAL DE L'ALLIAGE SUR LA PROPORTION			
	CUIVRE	ZINC	NICKEL		Cuivre	Zinc	Nickel	Métaux non prévus dans l'alliage
1	75	»	25	Réflecteurs de lanternes repoussés au tour.	± 1 0/0	»	± 1,5 0/0	Toutefois aucune trace de zinc n'est tolérée dans l'alliage 1er titre.
2	60	20	20	Pièces embouties.	± 1 0/0	± 1 0/0	± 1,5 0/0	
3	58	24	18	Pièces fondues.	± 1 0/0	± 1 0/0	+ proportion illimitée. — 1 0/0	

				ALLIAGES AU NICKEL	TOLÉRANCES
1	50	»	50	Employé pour la préparation des maillechorts.	Il est accordé pour la proportion de chacun des métaux prévus pour l'alliage une tolérance en plus ou en moins de 1 0/0 du poids de l'alliage. Le poids total des métaux autres que ceux prévus pour l'alliage ne doit pas dépasser 2 0/0 du poids de l'alliage.

CHEMINS DE FER DE L'EST

L'alliage employé pour les pièces en bronze de nickel sera composé comme suit :

Cuivre	60 à 58	
Nickel	18	minimum
Zinc	20 à 22	—
Divers	2 2	maximum
TOTAL	100 à 100	

CHEMINS DE FER DE L'ÉTAT

Bronze blanc de nickel :

Cuivre	58 0/0
Nickel	18 0/0
Zinc	24 0/0

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE XX

NICKEL-CUIVRE ET NICKEL-CUIVRE-ZINC

Behrens, *Das mikroskopische Gefüge der Metalle und Legierungen*, 1894 (*Micrographie*).

Gautier, *Contribution à l'étude des Alliages* (Société d'Encouragement), p. 93 (*Fusibilité*).

Guettier, *la Fonderie en France*.

Guillet, *Génie civil*, t. XLVII, 11, 1905 (*Micrographie*).

Hiorns, *Métallographie* (traduction de Bazin), Bérenger, éditeur (*Id.*); — *les Alliages métalliques* (traduction Boudouard), Steinheil, éditeur (*Généralités*).

Knab, *Traité des Alliages métalliques*, Steinheil, éditeur (*Généralités*).

Krupp, *Die Legierungen*, Vienne, 1894, p. 144 (*Id.*).

Ponthière, *les Alliages métalliques* (*Id.*).

ÉTAIN-NICKEL ET AUTRES ALLIAGES DE NICKEL

Gautier, *Contribution à l'étude des alliages métalliques* (Société d'Encouragement), p. 93 (*Fusibilité*).

Tupulti, *Annales de Chimie et de Physique*, LXXVIII, 133-1811, et LXXIX 153-1811.

CHAPITRE XXI

ALLIAGES DE COBALT

Le prix très élevé du cobalt (environ 30 francs le kilogramme) fait que ce métal ne se prête que bien peu aux applications industrielles.

De plus, il faut bien ajouter que ce métal ne semble pas apporter par lui-même des propriétés caractéristiques et intéressantes.

Nous avons déjà signalé le cas des aciers au cobalt, qui ne présente pas d'intérêt.

Berthier a essayé quelques alliages cobalt-cuivre et cobalt-étain.

Il a trouvé que l'alliage :

Cu....................	68,2
Co	31,8

était tenace, ductile, légèrement rosé et fortement magnétique.

L'alliage

Co	20
Sn	80

se laisse un peu marteler; il est cependant fragile et possède une cassure cristalline.

On pourrait d'ailleurs signaler un grand nombre de brevets pris sur les alliages de côbalt; mais nous ne croyons pas qu'ils aient en quoi que ce soit reçu la sanction de la pratique.

Nous croyons bon cependant de noter la substitution qui a été faite du cobalt à une partie du nickel dans le *silveroïd*, que nous avons déjà défini. On obtient un alliage qui est, paraît-il, encore plus brillant et plus beau après polissage. Mais son prix le rend inabordable à l'industrie. Seuls les fabricants d'instruments de précision l'utilisent.

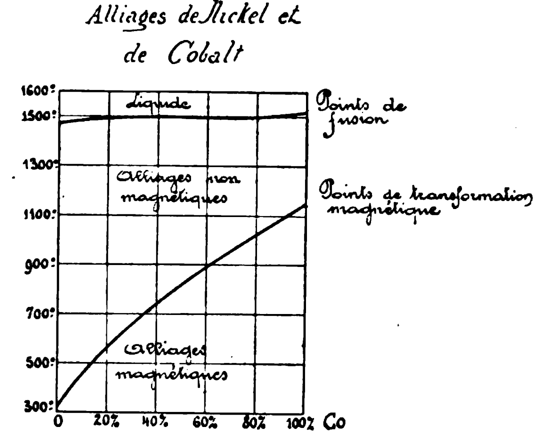


Fig. 201. — Diagramme des alliages nickel-cobalt (Guertler et Tammann).

Nous parlerons ailleurs des alliages cobalt - aluminium (Voir chap. xxii).

Nous tenons à rappeler des essais faits par M. Guillemin sur les alliages cuivre-cobalt, qui avaient donné des résultats intéressants, notamment au point de vue de la fabrication des planches et des enveloppes de balles de petit calibre. Il est à noter que ces alliages conservent la couleur rouge du cuivre jusqu'à une teneur de 50 0/0 de cobalt.

De quelques expériences que nous avons faites, notâmment sur les bronzes, il semble que le cobalt agit, dans les alliages (excepté dans les aciers), comme quatre fois son poids de nickel. Le prix du cobalt seul, nous le répétons, peut en empêcher de nombreux emplois.

Il n'a été fait aucune étude théorique sur les alliages de cobalt, excepté cependant sur les alliages nickel-cobalt. A signaler, toutefois, que Reichard a trouvé un maximum de résistance électrique pour les alliages cuivre-cobalt.

ALLIAGES DE NICKEL ET DE COBALT

Les alliages de nickel et de cobalt ont été étudiés par MM. Guertler et Tammann (*Journal of the Society of Chemical Industry*, XXIV, 137-905). — Comme le montre la figure 201, on a déterminé les points de fusion et de transformation magnétiques. La continuité des deux courbes montre que l'alliage est constitué par une solution solide avec mélange isomorphe de deux métaux.

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE XXI

Copaux, *Comptes Rendus*, CXL, 657-1905.

Guertler et Tammann, *Journal of the Society of Chemical Industry*, XXIV, p. 137, 905 (Co-Ni).

Voir aussi les traités généraux indiqués pour les alliages de nickel.

Guillemin, *Comptes Rendus*, 10 août 1885 (Co-Cu).

CHAPITRE XXII

ALLIAGES D'ALUMINIUM

Les principaux alliages binaires d'aluminium sont :

1° Les alliages aluminium-cuivre, que nous avons étudiés au chapitre XI;

2° Les alliages aluminium-fer;

3° Les alliages aluminium-étain;

4° Les alliages aluminium-zinc;

5° Les alliages aluminium-antimoine;

6° Les alliages aluminium-nickel;

7° Les alliages aluminium-cobalt;

8° Les alliages aluminium-magnésium dont il sera question au chapitre suivant;

9° Les alliages aluminium-manganèse, qui présentent un grand intérêt et que nous étudierons au chapitre XXVIII.

Il faut ajouter quelques alliages peu intéressants au point de vue pratique : les alliages aluminium-tungstène; aluminium-molybdène; aluminium-chrome; aluminium-titane et aluminium-silicium.

Il faut cependant noter que ces produits peuvent être utilisés comme matière première et servir à introduire dans les alliages des métaux qui sont très peu fusibles.

Enfin, il sera dit un mot des alliages aluminium-plomb; aluminium-cadmium; aluminium-bismuth; aluminium-argent; et nous résumerons l'étude théorique qui a été faite des alliages d'aluminium et d'or.

Nous parlerons ensuite d'alliages plus complexes.

ALLIAGES D'ALUMINIUM ET DE FER

Étude théorique. — Courbe de fusibilité. — Cette courbe (*fig.* 202) a été déterminée par Roberts-Austen, qui a montré qu'elle se compose d'une seule branche s'élevant rapidement du point de fusion de l'aluminium, puis restant sensiblement parallèle à l'axe des x entre les teneurs de 60 à 40 0/0 d'aluminium et gagnant ensuite le point de fusion du fer.

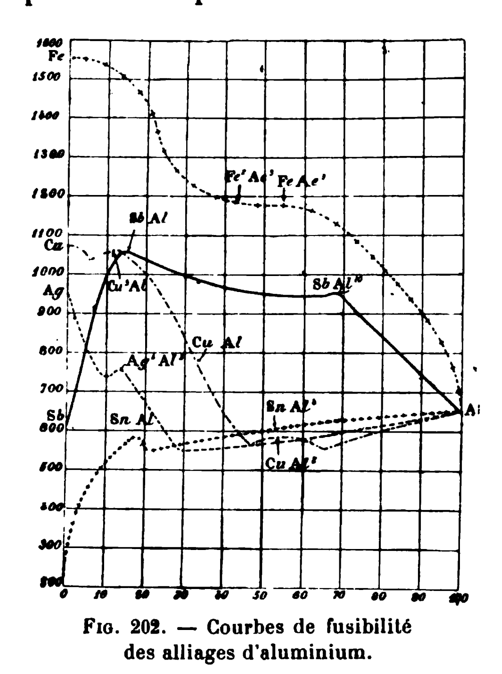


Fig. 202. — Courbes de fusibilité des alliages d'aluminium.

Étude chimique. — Crace Calvert et Johnson isolèrent d'alliages aluminium-fer le composé Fe^3Al^2. D'autre part, Wöhler et Michel obtinrent des prismes hexagonaux de formule $FeAl^2$ en traitant par l'acide chlorhydrique certains alliages riches en aluminium. Nous avons étudié les alliages aluminium-fer par voie aluminothermique.

On obtient par cette méthode des cristaux prismatiques correspondant à la formule $FeAl^3$. Il suffit, pour les obtenir, d'employer dans la réaction les proportions correspondant à la formation théorique des alliages $FeAl^2$ et $FeAl^4$.

Les mélanges qui sont compris entre les proportions donnant théoriquement FeAl et $Fe^{10}Al$ donnent des cristaux tétraédriques très nets que l'on peut facilement isoler. Ils correspondent à la formule Fe^2Al^3.

D'ailleurs, tous les culots métalliques renfermant ce composé tombent en poussière rapidement. Ce fait a été signalé par Roberts-Austen, qui l'attribue à une transformation allotropique et non à une oxydation.

Il semble, de plus, que les alliages les plus riches en fer contiennent une autre combinaison, probablement FeAl.

Comme on le voit, il reste encore de nombreux points à élucider sur la constitution de ces alliages.

Métallographie (Album, Pl. XCVII, Phot. 380 et 381). — Les alliages qui renferment le composé $FeAl^3$ nous ont donné des cristaux d'une netteté remarquable; ils ne semblent pas entourés d'eutectique.

Étude industrielle. — Fabrication. — Les alliages de fer et d'aluminium se préparent soit par réduction d'alumine en présence de fer au four électrique, soit par addition d'aluminium dans un bain de fer fondu.

Dans ce dernier cas, on peut obtenir aisément des alliages à 10 0/0 d'aluminium.

C'est cet alliage qui est le plus usité. Quelquefois on atteint 20 0/0 d'aluminium.

Propriétés. — Dès que le fer contenu dans l'aluminium dépasse 5 à 6 0/0, le métal devient fragile. A 7 0/0, il possède une structure cristalline. A partir de 20 0/0 d'aluminium, les alliages fer-aluminium ne sont pas magnétiques.

Utilisations. — Le ferro-aluminium n'est plus guère utilisé en aciérie. On préfère l'aluminium. Les premiers essais faits sur les moulages remontent à 1885; on sait que l'addition du ferro-aluminium au moment de la coulée empêche les soufflures. Il faut signaler, de plus, qu'à l'heure actuelle on commence à fabriquer, ainsi que nous l'avons déjà vu, des aciers renfermant des quantités un peu importantes d'aluminium et qui trouvent des débouchés intéressants dans les constructions électriques, à cause de leur faible hystérèse.

ALLIAGES D'ALUMINIUM ET D'ÉTAIN

Étude théorique. — COURBE DE FUSIBILITÉ. — Les alliages aluminium-étain ont été étudiés au point de vue de la fusibilité par M. Gautier. La courbe obtenue (*fig.* 202) présente un maximum correspondant à la combinaison AlSn.

ÉTUDE CHIMIQUE. — Nous avons cherché à isoler ce composé et ceux qui peuvent exister sans être indiqués par la courbe de fusibilité, en réduisant le bioxyde d'étain par l'aluminium suivant la méthode du Dr Hans Goldschmidt, décrite dans le chapitre 1er.

Nous nous sommes toujours servi de l'aluminium en grains scindés entre les tamis 25 et 30, et nous sommes partis d'acide stannique préparé par voie humide, en attaquant l'étain Banka par l'acide azotique pur.

Toutes les expériences ont été faites sur 3 kilogrammes de matière.

Les principales conclusions auxquelles nous avons été conduits sont les suivantes :

1° La limite d'inflammation a lieu pour l'expérience correspondant théoriquement à Al^4Sn ;

2° Toutes les réactions sont extrêmement violentes. Il y a des pertes énormes sous forme d'étain et d'acide stannique ;

3° Toutes les expériences, dont le mélange initial est plus riche en acide stannique que celui qui correspond à $AlSn^5$, ne laissent aucune partie métallique ; il ne reste dans le creuset que du corindon ;

4° La quantité d'étain contenue dans le culot ne va pas en croissant, quand on part des proportions correspondant à Al^4Sn, pour atteindre celles de l'expérience $AlSn^5$. Il y a de très grandes irrégularités, comme on le verra plus loin ;

5° L'expérience Al^4Sn, limite d'inflammation, ne donne qu'une importante masse de corindon, dans laquelle sont dis-

persées des lamelles cristallines très difficiles à détacher de la masse.

Mais, si l'on vient à placer dans un four Perrot ce mélange acide stannique-aluminium, de façon à le porter à une température d'environ 800°, et si l'on vient à l'enflammer lorsqu'il a atteint cette température, on obtient un culot dans lequel on remarque de nombreux cristaux filiformes pris dans la masse[1];

6° En faisant varier les proportions d'aluminium en excès, nous avons pu isoler sous forme de cristaux et sous forme de poudres cristallines, deux combinaisons correspondant aux formules AlSn et Al^4Sn.

En résumé, nous avons pu isoler les deux combinaisons

AlSn et Al^4Sn

dont nous allons résumer les propriétés.

Le composé AlSn se présente sous la forme de lamelles malléables.

Le système cristallin de la combinaison Al^4Sn ne peut être déterminé. Ces cristaux ne sont ni durs, ni cassants; ils présentent même une certaine malléabilité.

Ils ont pour densité :

	DENSITÉ TROUVÉE A 20°	DENSITÉ THÉORIQUE
AlSn	5,14	5,37
Al^4Sn	3,75	3,80

L'oxygène agit facilement sur ces deux combinaisons lorsqu'elles sont portées vers 300 à 500°; la surface se recouvre d'une couche d'oxydes.

1. Si l'on prolongeait trop le chauffage, la réaction aurait lieu dans le four même. — Cet accident nous est arrivé à plusieurs reprises et a occasionné de nombreux dégâts.

L'eau les attaque dans les mêmes conditions.

L'acide sulfurique dilué ne donne rien à froid ; mais, à l'ébullition, il a une action, faible au début, mais qui devient de plus en plus vive. L'acide concentré produit une attaque violente. L'acide chlorhydrique, même dilué, donne une réaction très nette. Quant à l'acide azotique, à froid, il agit très vivement sur les deux combinaisons; mais les grains se recouvrent d'une couche de bioxyde d'étain, et l'action n'est jamais complète. C'est pourquoi le mode de dosage consistant à transformer l'étain en acide stannique ne peut être utilisé ici. L'eau régale, riche en acide chlorhydrique, produit une dissolution rapide et complète des deux produits. Si l'eau régale est riche en acide azotique, l'attaque est incomplète, comme pour ce dernier produit.

La potasse concentrée donne lieu à une réaction vive.

Le chlore produit une décomposition rapide vers 200 à 250°, en donnant du tétrachlorure d'étain et du chlorure d'aluminium.

Métallographie. — Le composé SnAl a pu être observé, bien que le polissage ait été d'une extrême difficulté.

L'attaque électrolytique par l'hyposulfite de soude en liqueur étendue montre de nombreux cristaux se détachant en blanc sur fond noir.

Quant au composé $SnAl^4$, il n'a pu être observé directement; nous avons essayé de reproduire cet alliage par union directe d'étain et d'aluminium. Nous n'avons obtenu qu'un photogramme se rapprochant de celui de SnAl.

D'autre part, en superposant de l'étain et de l'aluminium fondu et en les laissant diffuser l'un dans l'autre, nous n'avons obtenu qu'une image semblable à celle de SnAl.

Ceci tendrait à prouver que :

Ou $SnAl^4$ a même photogramme que SnAl;

Ou $SnAl^4$ ne se forme pas lorsque l'on fond ensemble de l'étain et de l'aluminium.

Autres recherches. — M. Shepherd a repris tout dernièrement l'étude de ces alliages (*Physical Chemistry*, XIII, 1904) et

conclut que : 1° le minimum de la courbe de fusibilité n'a pas lieu ; 2° les composés AlSn et Al^4Sn n'existent pas; mais que l'analyse met en évidence l'existence d'une solution solide contenant environ 20 0/0 d'étain.

Dans une note présentée à l'Institut, le 9 mai 1904, par M. Violle, M. Pécheux expose une propriété curieuse de ces alliages.

« En plongeant dans l'eau distillée froide à 13° une baguette d'alliage étain-aluminium dont on vient de limer la surface pour lui donner plus de poli, cette baguette ayant été coulée, auparavant, dans une lingotière en sable gras d'étuve, on obtient un abondant dégagement de gaz autour de la partie limée de la baguette. Le dégagement dure d'autant plus longtemps que l'usure à la lime est plus longue; il s'arrête au bout de deux à trois minutes.

« Ce phénomène est obtenu avec l'un ou l'autre des quatre alliages non cristallisables : Sn^5Al, Sn^3Al, Sn^2Al, $SnAl^3$.

« L'analyse des gaz recueillis montre qu'ils sont formés d'oxygène et d'hydrogène dans la proportion du mélange détonant.

« Une baguette de l'un des métaux composants ne donne lieu à aucun phénomène de ce genre, après qu'on l'a ou chauffée ou limée.

« Une baguette d'alliage non limée et chauffée à une température voisine de celle que produit le limage est sans action.

« Considérant que la surface des baguettes, par suite du refroidissement brusque dans les moules légèrement humides, a dû être soumise à la trempe, qui a pu produire une véritable combinaison de l'étain et de l'aluminium, nous concluons que :

« Les alliages étain-aluminium ne doivent être formés, sauf à la surface trempée, que par la juxtaposition des molécules des deux métaux ; l'immersion d'une baguette limée, dans l'eau froide, doit mettre, au contact de cette eau, comme une série de petits éléments thermo-électriques étain-aluminium, qui la décomposent immédiatement; car les molécules d'étain et celles d'aluminum, en raison de leur différence très sensible

de chaleurs spécifiques (aluminium : $0^{cal},218$; étain : $0^{cal},0562$), ne sont pas à la même température (ces molécules étant chauffées par le frottement de la lime) ; d'où naissance d'une force électromotrice qui s'annule quand les températures des deux sortes de molécules s'égalisent par le contact prolongé avec l'eau froide.

« L'eau distillée à l'ébullition est décomposée par une baguette d'étain-aluminium non usée à la lime, comme si le recuit qui se produit détruisait la combinaison des métaux à la surface.

« Si l'on plonge une baguette limée dans la solution légèrement acidulée de sulfate de cuivre, il se dégage des bulles d'oxygène et le cuivre se dépose sur la baguette non limée; une baguette d'étain ou d'aluminium précipite le cuivre du sulfate ; mais il ne se dégage pas de gaz.

« Le sulfate de zinc, de formation plus exothermique, se comporte de même que le sulfate de cuivre, le dégagement d'oxygène étant moins actif. »

Étude industrielle. — L'utilisation des alliages aluminium-étain a été étudiée par Bourbouze, qui, dès le 25 juillet 1884, présenta à la Société d'Encouragement pour l'Industrie nationale un alliage renfermant :

Al................	83,3 0/0
Sn................	16,7 0/0

Il en prépara plus tard un nouveau type correspondant à :

Al................	90,9 0/0
Sn................	9,1 0/0

Dans les résultats de ces expériences, Bourbouze dit que les résistances peuvent atteindre jusqu'à 36 à 38 kilogrammes[1]. De plus, le dernier alliage jouit d'une malléabilité et d'une dureté

1. L'état sous lequel a été essayé le métal (coulé, laminé, recuit) n'est pas indiqué.

telles que dix balles de revolver d'ordonnance, tirées à 10 mètres sur une plaque de 4 millimètres d'épaisseur, d'un poids ne dépassant guère le tiers de celui d'une plaque semblable en acier chromé, ne donnaient, à incidence normale, que de fortes dépressions dans la masse et à 45° que de simples mouchetés (Moissonnier, *l'Aluminium*, p. 147, Gauthier-Villars, éditeur).

Le dernier alliage possède une belle couleur blanche et n'est pas beaucoup plus lourd ($d = 2{,}85$) que l'aluminium. Il présenterait un grand avantage sur ce métal; car il se soude très aisément[1]. Mais il est aisément altéré, même par les agents atmosphériques; il se produit de l'oxydation. On cherche cependant à employer un alliage renfermant 3 0/0 d'étain qui a 3,23 comme densité et présente une grande facilité de moulage. Il est usité pour l'ornementation, pour la préparation des enveloppes.

ALLIAGES D'ALUMINIUM ET DE ZINC

Étude théorique. — COURBE DE FUSIBILITÉ. — Cette courbe a été déterminée par M. Roland Gosselin; elle est formée de deux branches se rencontrant en un point eutectique qui correspond à un alliage renfermant environ 5 0/0 d'aluminium et fondant à 389°.

Nous verrons qu'un travail très important vient d'être fait sur cet alliage, on le trouvera résumé dans l'*Appendice*.

Étude industrielle. — Les alliages aluminium-zinc ne sont que peu utilisés dans l'industrie. Il faut, toutefois, citer un alliage renfermant :

Zn	95
Al	5

utilisé par l'American Gramophone C° pour certaines par-

1. Il faut bien noter que l'on a découvert récemment un moyen des plus simples pour faire la soudure de l'aluminium sur aluminium.

ties de ses appareils et un alliage contenant un peu de cuivre et ayant la composition :

Al	72
Zn	24
Cu	4

Il a été lancé sous le nom de *macadamite* et employé en grandes quantités pour remplacer le laiton dans un grand nombre de ses applications. Il se polit fort bien, et on lui a attribué une forte résistance aux agents chimiques, ce dont nous doutons fort. Sa charge de rupture atteindrait 31 kilogrammes.

Debray, Hirzel, et plus récemment Franck se sont occupés de ces alliages sans apporter de données importantes.

On pourrait s'étonner que les alliages d'aluminium et de zinc n'aient pas pris plus de développement, étant donné surtout qu'ils se moulent aisément, ce qui les fait parfois utiliser pour l'ornementation. Jusqu'à 15 0/0, le zinc donne avec l'aluminium des alliages très malléables et pouvant se travailler ; jusqu'aux environs de 30 0/0, on a un métal pouvant être utilisé aisément pour le moulage. Ils sont d'ailleurs assez résistants aux agents atmosphériques ; mais ils deviennent cristallins et fragiles sous l'influence des chocs répétés.

ALLIAGES D'ALUMINIUM ET DE CADMIUM

Ces alliages ont été quelque peu étudiés par Debray, Deville, Frank, Campbell et Mathews. Ils sont quelquefois utilisés pour souder l'aluminium. Debray et Tissié ont signalé que l'aluminium renfermant 1/100 de plomb était très cassant.

On a étudié quelques alliages aluminium-bismuth-étain (Campbell et Mathews).

ALLIAGES D'ALUMINIUM ET D'ANTIMOINE

Étude théorique. — COURBE DE FUSIBILITÉ. — La courbe de fusibilité des alliages antimoine-aluminium a été déterminée

par M. Gautier. Cette courbe (*fig.* 202) présente deux maxima : l'un indique la combinaison SbAl ; l'autre, une combinaison voisine de $SbAl^{10}$. La combinaison SbAl a été isolée par M. Wright, qui en a étudié les propriétés ; elle est caractérisée par son point de fusion très élevé, qui est voisin de celui du cuivre.

Étude chimique. — Nous avons cherché à étudier les diverses combinaisons de l'aluminium et de l'antimoine, en appliquant la méthode déjà indiquée pour les autres alliages.

En partant de l'acide antimonique, nous avons eu des réactions extrêmement violentes : nous avons été limités à deux expériences, celles donnant théoriquement $SbAl^3$ et $SbAl^4$. La réaction théorique $SbAl^2$ et toutes celles contenant plus d'oxyde antimonique se font avec une violence telle que toute la masse est projetée hors du creuset. Pour les expériences plus riches en aluminium que celles donnant théoriquement $SbAl^4$, il n'y a plus inflammation.

Les deux expériences faites ont donné des rognons métalliques et cristallins répandus dans la masse d'alumine. Ces rognons ont été limés, puis tamisés : les poudres ainsi obtenues ont été traitées par l'acide chlorhydrique étendu. Nous avons pu ainsi isoler la combinaison $SbAl^{10}$.

En résumé, nous avons obtenu la combinaison $SbAl^{10}$ qui n'avait pas encore été isolée et qui correspond bien à un des maxima de la courbe de fusibilité.

Ses principales propriétés sont les suivantes :

Ce composé se présente sous la forme d'une poudre noirâtre brillante ayant pour densité à 20°, 2,70 ; densité théorique, 3,16. Il y a donc une augmentation de volume notable.

Cette combinaison a pour point de fusion environ 1.050°. Si on fond cette poudre avec de l'aluminium (jusqu'à 25 0/0), les culots obtenus tombent en poussière au bout de quelques mois. L'air ne paraît pas avoir d'action à froid ; mais il y a oxydation rapide vers 150°.

L'acide sulfurique dilué attaque facilement ce composé.

L'acide azotique ne le dissout qu'à chaud, tandis que l'acide chlorhydrique produit une réaction extrêmement vive à froid et une prompte dissolution.

La potasse réagit rapidement même à froid ; le chlore vers 250°. Mais l'action la plus intéressante est celle de l'eau.

Si l'on fait bouillir de l'eau contenant $SbAl^{10}$, on remarque un dégagement d'hydrogène, et, si on laisse refroidir, le dégagement continue d'une façon plus lente, mais cependant très notable[1]. Parfois même on obtient de l'hydrogène antimonié.

Nous avons essayé la réduction du protoxyde Sb^2O^3 en partant du même principe.

Une seule réaction nous a donné des résultats : c'est celle qui donnerait théoriquement SbAl. Elle fournit un culot métallique assez net, mais qui, débarrassé de l'aluminium en excès, ne semble correspondre à aucune combinaison.

Il faut avoir soin, dans ces diverses expériences, de n'opérer que sur 500 grammes de matières au maximum et de prendre de grandes précautions, car elles sont fort dangereuses.

D'autre part, nous avons fondu de l'aluminium et nous avons jeté l'antimoine métallique sur ce métal liquide ; l'antimoine est tombé au fond du creuset, où il s'est rassemblé et a fondu. Sans avoir agité, nous avons laissé refroidir, nous avons recueilli deux culots distincts, l'un contenant l'aluminium, l'autre l'antimoine.

Nous avons fait à nouveau cette expérience en agitant ; l'antimoine s'est parfaitement mélangé à l'aluminium et nous avons noté une augmentation de volume très notable. Le culot obtenu était très noirâtre ; il est tombé rapidement en poussière ; il décomposait l'eau à froid en donnant de l'hydrogène et de l'hydrogène antimonié.

Il avait pour densité à 20° : 4,18, tandis que la densité théorique de SbAl est de 5,22.

Ceci est bien en correspondance avec les faits que nous avons signalés. Nous nous sommes proposé d'étudier par le

1. La densité de ce composé a été déterminée dans l'alcool absolu.

même moyen les alliages aluminium-plomb, aluminium-bismuth et aluminium-cadmium; nous n'avons obtenu aucun résultat.

Pour les deux premières séries d'alliages, la masse placée dans le creuset est, au moment même de l'inflammation, projetée complètement hors du vase, et cela très souvent avec des détonations d'une violence extrême. Nous avons bien observé la formation de quelques cristaux avec les oxydes de plomb ; mais il nous a été impossible de les recueillir en quantités suffisantes pour en faire l'analyse.

Métallographie (Album, Pl. XCVII, Phot. 382). — En polissant le culot qui avait donné $SbAl^{10}$ et en l'attaquant électrolytiquement par une dissolution très étendue de chlorure de sodium, nous avons obtenu de vastes cristaux très dentelés se détachant sur un fond blanc d'aluminium.

D'autre part, en fondant ensemble de l'aluminium et de l'antimoine en proportions convenables, nous avons préparé le produit SbAl isolé par Wright; ce composé nous a donné un photogramme spécial, dans lequel on trouve des cristaux dentelés, se rapprochant beaucoup des précédents, mais se détachant sur un fond gris et blanc.

M. Pécheux a, dans une note récente à l'Institut (20 juin 1904), exposé les quelques résultats qu'il a obtenus sur des alliages qui fondaient à moins de 800°. Il a pu obtenir ainsi des alliages qui se dilatent en se solidifiant et qui présentent une certaine malléabilité.

Étude industrielle. — Les alliages d'antimoine et d'aluminium n'ont pas d'emplois industriels. Ils s'altèrent très facilement.

« Le seul alliage utile que Roche admet est celui à moins de 5 0/0 d'antimoine; celui-ci, il est vrai, peut être obtenu tout à fait homogène; il fond et peut être laminé très bien; enfin, il paraît être, sous de nombreux rapports, supérieur à l'aluminium pur. Mais, si l'on attend quelques mois, on trouvera que l'alliage s'est désagrégé au point de n'avoir plus de

valeur, ce qui n'a été reconnu probablement que de nos jours; notre expérience personnelle nous a conduit aux mêmes conclusions que Richards. » (Moissonnier, *l'Aluminium.*)

M. Baxérès a essayé des alliages assez complexes d'aluminium, qui étaient obtenus par addition d'antimoniures; ceux-ci étaient préparés par fusion directe des deux métaux. Ses recherches ont porté sur l'introduction dans l'aluminium d'antimoniures : nickel-chrome; nickel-titane; nickel-fer, voire même nickel-chrome-titane; nickel-chrome-titane-tungstène, etc. Ces produits étaient généralement ajoutés à l'aluminium à dose de 1 0/0, et M. Baxérès constata que l'on durcissait ainsi le métal.

Ces recherches, qui nous paraissent avoir été menées d'une façon aussi peu logique que scientifique, n'ont pas, croyons-nous, conduit à des résultats industriels bien intéressants.

ALLIAGES D'ALUMINIUM ET DE NICKEL

Étude théorique. — Étude chimique. — Wöhler et Michel obtinrent un composé correspondant à Al^6Ni se présentant en grandes lames cristallines d'un blanc d'étain, en fondant 8 0/0 d'aluminium avec 3 0/0 de chlorure de nickel sublimé et 20 0/0 d'un mélange de chlorures de potassium et de sodium.

En réduisant l'oxyde de nickel par l'aluminium, nous avons pu étudier dans certaines limites la constitution de ces alliages.

Nous résumerons les conclusions générales de ces recherches :

1° La limite d'inflammation correspond à la formation théorique de $NiAl^2$;

2° Toutes les expériences laissent des culots qui présentent des cristallisations très nettes. Elles se font toutes avec très grande violence et même avec de très fortes explosions. Le

corindon est projeté, en partie, hors du creuset; il se rassemble alors sous forme de rognons assez volumineux contenant au centre une petite masse métallique.

Le corindon est très fortement coloré en bleu pâle par le nickel entraîné; il présente même de très jolies cristallisations;

3° Les masses métalliques contenant entre 50 et 80 0/0 de nickel tombent lentement en poussière;

4° Les produits ayant une teneur en nickel comprise entre 80 et 95 0/0 sont malléables, mais présentent une dureté extraordinaire; on ne peut même pas les travailler avec des limes en acier au chrome, sans qu'il y ait entraînement de fer.

Nous avons pu isoler sous forme de petits cristaux les composés $NiAl^2$ et Ni^2Al en réduisant l'oxyde de nickel par l'aluminium et en faisant varier les proportions d'aluminium.

De plus, par simple fusion en proportions convenables de nickel et d'aluminium, nous avons obtenu de longs cristaux correspondant à la formule $NiAl^6$. Ce sont justement ceux isolés par Whöler et Michel.

La combinaison $NiAl^2$ se présente sous forme de lamelles cristallines très malléables. Le composé Ni^2Al a une couleur légèrement dorée.

Le composé $NiAl^2$ a pour densité 4,11, au lieu de 4,22 (théorie).

L'oxygène n'a d'action sur ces deux combinaisons qu'à haute température; l'eau les attaque vers 300°; l'acide chlorhydrique agit lentement sur Ni^2Al, très rapidement sur $NiAl^2$; l'acide azotique joue le rôle inverse.

Métallographie (Album, Pl. XCVIII, Phot. 384). — La métallographie microscopique de ces alliages a été faite avec grand soin; de 100 à 95 0/0 de nickel; on obtient de vastes cellules qui semblent indiquer une solution solide; aux environs de 90, on trouve un eutectique; entre 90 et 80 0/0, on voit des cristaux de la combinaison Ni^2Al.

De 50 à 80 0/0, la métallographie ne donne aucun rensei-

gnement, les culots métalliques étant impossibles à polir. Au-dessous de 50 0/0, on rencontre les cristaux de la combinaison $NiAl^6$. Nous n'avons pas examiné d'alliages renfermant moins de 30 0/0 d'aluminium.

Étude industrielle. — On sait, depuis un certain nombre d'années, que les alliages aluminium-nickel jouissent de qualités mécaniques fort intéressantes, notamment lorsque le nickel contenu ne dépasse pas 2 0/0. Au-delà de 5 à 6 0/0, le composé Al^6Ni ou, du moins, l'eutectique Al-Al^6Ni étant en trop grandes quantités, l'alliage devient fragile. Voici les résultats d'expériences que nous avons faites sur un alliage à 2 0/0 de nickel, qui s'est très bien laminé. Il a donné après recuit à 450° :

R	19
A 0/0	20

Sans recuit, nous avons obtenu :

R	32
A 0/0	12

On a également lancé quelques alliages renfermant 2 0/0 de nickel et 2 à 3 0/0 de cuivre. Ils ne présentent pas un grand avantage sur ceux simplement au nickel. Ils ont été cependant employés pour la confection de tôles pour yachts.

Enfin parfois on introduit dans l'aluminium le nickel sous forme de ferro-nickel. — Un alliage, dernièrement lancé dans les constructions automobiles, est ainsi obtenu.

Dans leur étude sur les alliages d'aluminium (*American Chemical Society*, mars 1902), MM. Campbell et Andrews écrivent :

« Le métal le plus ordinairement employé pour durcir l'aluminium est le nickel. A cet effet on emploie de 2 à 5 0/0 de nickel, souvent avec adjonction de cuivre, tungstène et autres durcissants. Quand la proportion de ces durcissants est de 7 à 10 0/0, on obtient un alliage qui fond très bien et qui est

très dur. Nous avons confectionné des alliages contenant 2,12; 3,14; 4,15 et 7,97 0/0 de nickel. Les premiers d'entre eux contenaient quelques cristaux brillants, tandis que le dernier consistait en un réseau de cristaux squelettes. En les isolant au moyen de l'acide chlorhydrique dilué, on obtenait des cristaux particulièrement beaux, chaque cristal constitué de petites lames dendritiques très nombreuses. La masse fondamentale dans laquelle se trouvent ces cristaux est isomorphe avec l'aluminium et fond à une température légèrement plus basse. »

Il faut ajouter, comme nous l'ont prouvé de nombreux essais, que les alliages aluminium-nickel sont les plus attaqués par l'eau.

ALLIAGES D'ALUMINIUM ET DE COBALT

Étude théorique (Album, Pl. XCVIII, Phot. 385 à 387). — Les alliages aluminium-cobalt ont donné des résultats en tous points semblables à ceux obtenus par l'aluminium et le nickel. Nous donnons quelques micrographies qui se rapprochent beaucoup de celles données pour les alliages aluminium-nickel.

Étude industrielle. — Les alliages au cobalt n'offrent aucun intérêt industriel, bien qu'ils aient été brevetés en 1896 par Pearson. Leur prix est trop élevé.

ALLIAGES D'ALUMINIUM ET DE TUNGSTÈNE

Étude théorique. — Étude chimique. — Les alliages aluminium-tungstène ont été étudiés par Wöhler et Michel, qui isolèrent la combinaison Al^4Tu par la fusion de 15 grammes d'anhydride tungstique, 30 grammes de cryolithe, 30 grammes de chlorure de sodium et 15 grammes d'aluminium.

Pour effectuer nos recherches sur la réduction de l'acide tungstique par l'aluminium, nous nous sommes servi d'acide tungstique presque pur, contenant environ 2 0/0 de silice et des traces de fer. Toutes les expériences ont porté sur 3 kilogrammes de mélange.

Les conclusions de ces recherches ont été les suivantes :

1° On est limité, d'une part, par la réaction $AlTu^{10}$, et, d'autre part, par la réaction Al^5Tu. Au-delà de ces deux limites on n'obtient aucune partie métallique susceptible d'être triée. La limite d'inflammation n'a lieu que pour l'expérience correspondant à Al^6Tu;

2° Toutes ces recherches se font avec des pertes énormes de matière, qui ont lieu surtout sous forme d'oxyde vert;

3° Tous les culots obtenus dans ces expériences, à l'exception de celles qui donneraient Al^4Tu, laissent dans l'eau régale concentrée un résidu parfaitement cristallisé qui correspond à la formule $AlTu^2$;

4° Les expériences faites avec des proportions de matières comprises entre celles qui conduiraient théoriquement aux alliages AlTu et Al^5Tu donnent de très abondants cristaux lamellaires, qui sont recouverts d'une mince couche d'aluminium et paraissent très ternes. Ces cristaux sont toujours situés entre le culot métallique et le corindon, notamment sur la périphérie. Ces cristaux correspondent à la formule Al^4Tu; ce sont donc ceux préparés par Wöhler;

5° Les expériences faites avec des proportions de produits conduisant théoriquement aux alliages AlTu et $AlTu^5$ donnent des cristaux aciculaires très faciles à séparer et généralement purs. Ces cristaux forment de superbes amas à la surface du culot métallique, mais ne sont jamais abondants.

Ils correspondent à la formule Al^3Tu;

6° Les culots métalliques ne contiennent généralement que fort peu d'aluminium libre;

7° Quelques expériences ont été faites en partant de TuO^2 préparé par action de l'hydrogène sur l'acide tungstique. La limite d'inflammation est abaissée, les pertes sont beaucoup moins abondantes, les culots obtenus sont mieux formés; mais les cristallisations sont beaucoup plus rares. Aucun résultat nouveau n'a été donné par ces recherches.

Les principales propriétés de ces combinaisons sont les suivantes :

Le composé $AlTu^2$ se présente sous forme de poudre cristalline noirâtre ; Al^3Tu est constitué par des cristaux se présentant sous forme de prismes cannelés d'apparence quadratique. Enfin Al^4Tu se présente sous forme de cristaux lamellaires atteignant parfois d'importantes dimensions (2 ou 3 centimètres carrés); ces cristaux sont souvent recouverts d'une mince couche d'aluminium que l'on enlève facilement par l'acide chlorhydrique très dilué; les lamelles sont analogues à celles d'oligiste spéculaire des volcans.

Les densités de ces différents corps sont :

	DENSITÉS TROUVÉES À 20°	DENSITÉS THÉORIQUES $D_{Tu} = 18{,}07$
$AlTu^2$	12,75	13,06
Al^3Tu	6,31	6,38
Al^4Tu	5,56	5,62

Les combinaisons aluminium-tungstène ne sont pas attaquées par l'oxygène à la température ordinaire, ou même au-dessous du rouge. Mais, à cette température, on obtient rapidement de l'acide tungstique, de l'oxyde bleu et de l'alumine. L'eau bouillante produit une légère attaque; les cristaux se recouvrent d'une mince couche d'oxyde, qui les protège contre une altération ultérieure. L'acide sulfurique agit très lentement; il en est de même de l'acide chlorhydrique; cependant le composé Al^4Tu est dissous assez vivement à l'ébullition.

L'acide azotique concentré et bouillant produit une attaque lente ; mais, comme l'acide tungstique formé se trouve en présence d'aluminium, corps réducteur, il se produit de l'oxyde bleu. A la fin, il y a oxydation complète et formation d'acide tungstique. L'eau régale n'attaque pas $AlTu^2$; elle décompose lentement Al^3Tu et très rapidement Al^4Tu.

La potasse concentrée ou étendue ne produit rien à froid

mais à chaud il y a attaque d'autant plus rapide que les produits sont plus riches en aluminium.

Le chlore est sans action sur ces combinaisons à la température ordinaire ; mais, vers 300°, il se produit du chlorure d'aluminium et de l'hexachlorure de tungstène qui se volatilisent.

Métallographie (Album, Pl. XCVII, Phot. 383). — La plupart des culots obtenus contiennent un très grand nombre de petites cavités, de telle sorte que leur observation et surtout leur photographie sont irréalisables.

Seul le photogramme du composé Al^4Tu a pu être fait : par simple polissage en bas-relief, on obtient des cristaux blancs, très brillants sur fond terne.

Étude industrielle. — Un certain nombre d'alliages d'aluminium, dont quelques-uns employés couramment dans l'industrie, ont été lancés comme renfermant du tungstène. Nous en avons analysé plusieurs échantillons, et nous n'y avons jamais rencontré ce métal. Nous croyons qu'il n'existe aucune donnée précise sur ces produits. Il faut ajouter que MM. Le Verrier et Bernheim ont signalé des alliages d'aluminium-tungstène ne contenant pas de fer, qui étaient intéressants.

ALLIAGES D'ALUMINIUM ET DE MOLYBDÈNE

Étude théorique. — Étude chimique. — Par une méthode analogue à celle indiquée pour la préparation de Al^4Tu, Wöhler isola une combinaison correspondant à la formule Al^3Mo.

Pour étudier la réduction de l'acide molybdique par l'aluminium, nous avons toujours opéré sur 3 kilogrammes de matières.

Voici les résultats généraux auxquels nous sommes arrivés :

1° La limite d'inflammation a lieu pour l'expérience qui

correspond à la formation théorique du composé Al^6Mo. Mais on n'obtient des cristaux ou des parties métalliques susceptibles d'être triés qu'entre les expériences dont les proportions donneraient Al^6Mo et $AlMo^{15}$;

2° Parmi les culots métalliques obtenus, quelques-uns deviennent très friables au bout de fort peu de temps. C'est ainsi que tous ceux obtenus dans les expériences comprises entre celles qui donneraient théoriquement Al^4Mo et Al^6Mo, abandonnés dans des conserves, se sont transformés lentement en poudre impalpable. Ce phénomène provient d'un changement allotropique et non d'une oxydation, car nous n'avons pas noté une augmentation de poids pendant cette transformation;

3° Au cours de ces expériences, nous avons remarqué très souvent la présence de rognons métalliques qui se forment à la surface de la masse. Ces rognons sont formés par des agglomérats de cristaux, généralement aciculaires, correspondant à la combinaison AlMo, toujours plus riches en aluminium que la partie constituant le culot. Ces alliages paraissent être séparés par liquation;

4° Toutes ces expériences se font avec des pertes considérables qui ont lieu surtout sous forme d'oxyde vert;

5° Les cristaux, aussi bien que les poudres cristallines, sont obtenus, comme on le verra plus loin, dans des conditions bien déterminées. Nous avons pu ainsi isoler sous forme de cristaux les combinaisons Al^3Mo, AlMo et Al^7Mo et, sous forme de poudre cristalline, un autre composé[1] $AlMo^4$;

6° Un grand nombre de culots laissent dans l'acide chlorhydrique étendu des résidus cristallisés formés probablement de plusieurs combinaisons. Le même mélange est généralement obtenu dans plusieurs réactions.

Le composé $AlMo^4$ se présente sous forme de poudre. Le culot qui le fournit a une cassure très nette, d'un gris d'acier.

1. Nous avons cru isoler deux autres combinaisons correspondant aux formules Al^2Mo et $AlMo^{20}$. Des recherches plus récentes nous ont montré que Al^2Mo n'était constitué que par Al^3Mo + AlMo et que l'aluminium contenu dans $AlMo^{20}$ s'y trouvait sous forme de siliciure d'aluminium.

La poudre obtenue par l'acide chlorhydrique étendu est très dure, comme d'ailleurs les combinaisons AlMo et Al^3Mo. Comme AlTu, le composé AlMo se présente en prismes cannelés d'apparence quadratique. Quant à l'alliage Al^3Mo, il a les mêmes apparences cristallographiques que Al^4Tu. Les densités de ces composés sont les suivantes :

	DENSITÉS TROUVÉES à 20°	DENSITÉ THÉORIQUE $d_{Mo} = 9,01$
$AlMo^4$	8,10	7,73
AlMo	5,34	5,79
Al^3Mo	4,45	4,18
Al^7Mo	3,52	3,37

L'oxygène n'attaque pas ces combinaisons à la température ordinaire, à l'exception de Al^6Mo, qui se recouvre d'une légère couche d'alumine ; à la température élevée, on obtient de l'alumine, de l'acide molybdique qui se volatilise et de l'oxyde bleu qui recouvre les cristaux et forme après refroidissement une couche bleue. C'est le composé $AlMo^4$ qui s'oxyde le plus facilement.

L'eau bouillante ne paraît pas avoir d'action ; mais, vers 350°, il y a formation d'oxydes de molybdène et d'alumine, et l'on remarque que les cristaux sont recouverts d'oxyde bleu et de points blancs. Les acides n'attaquent que lentement ces composés ; cependant l'acide chlorhydrique à chaud décompose rapidement Al^3Mo et Al^7Mo.

L'action de l'acide azotique est particulièrement intéressante. Si l'on fait réagir sur l'une des combinaisons, notamment AlMo ou Al^3Mo, l'acide azotique concentré et froid, on note une action lente ; la liqueur prend d'abord une teinte brun clair ; puis rose, après trois heures. Si l'on fait bouillir, la teinte disparaît, la liqueur redevient incolore.

Si l'on attaque par l'acide azotique étendu de son volume

d'eau, on obtient un dépôt brun cristallin, qui est du bioxyde de molybdène.

Le chlore est sans action sur ces composés à froid. Mais, vers 300°, il se forme rapidement du chlorure de molybdène et du chlorure d'aluminium.

Ces alliages n'ont pas été étudiés au point de vue industriel.

ALLIAGES D'ALUMINIUM ET CHROME

Étude théorique. — Wöhler et Michel, en réduisant le chlorure de chrome par l'aluminium, obtinrent un alliage de formule $CrAl$.

Dans les expériences que nous avons faites, nous nous sommes servi d'aluminium dit de thermite et d'oxyde de chrome en poudre; nous avons toujours opéré sur 2 kilogrammes.

Voici les résultats auxquels nous sommes arrivé :

1° La propagation de la réaction n'a lieu que si le mélange est préalablement porté à une température d'environ 600° ;

2° Dans ces conditions, la limite d'inflammation correspond à $CrAl^2$;

3° Les culots que l'on obtient sont très nets ; ils se séparent aisément du corindon et ne présentent que rarement des cristallisations franches. Aucun cristal ne peut être séparé de la masse ;

4° L'alumine entraîne des quantités notables de chrome ; elle est souvent colorée en rouge, d'où le nom de corubis qui lui a été donné ;

5° Les culots obtenus dans ces expériences sont durs et cassants ;

6° Nous avons isolé les deux combinaisons Cr^4Al et $CrAl$.

Les limites dans lesquelles nous avons pu opérer ne nous ont pas permis d'atteindre des teneurs en aluminium supérieures à 35 0/0.

Les deux composés isolés se présentent en poudre d'un gris argenté; elles sont extrêmement brillantes. Leurs densités sont les suivantes :

	DENSITÉS TROUVÉES À 20°	DENSITÉS CALCULÉES
Cr^4Al	6,75	5,78
CrAl	4,93	4,60

Le premier de ces composés se forme donc avec forte contraction.

L'oxygène n'attaque ces alliages que vers 300-350°.

L'eau est sans action. Les acides sulfurique et chlorhydrique, ainsi que l'eau régale, les dissolvent lentement à froid, assez rapidement à l'ébullition.

Le chlore n'agit qu'à chaud.

Les alcalis ne les attaquent pas sensiblement, même à l'ébullition.

La micrographie montre des cristaux de la combinaison CrAl.

Étude industrielle. — M. Richards fait remarquer que le chrome durcit considérablement l'aluminium, en lui communiquant, ajoute-t-il, quelques-unes des propriétés des aciers rapides (???). Ils conservent leur dureté, même après recuit. Il ajoute que la proportion de 2,3 0/0 de chrome semble la plus recommandable. A 11 0/0, on a un alliage très fragile.

D'après M. Richards, certains de ces alliages sont employés dans l'industrie.

ALLIAGES D'ALUMINIUM ET DE TITANE

Étude théorique. — Étude chimique. — En appliquant la méthode déjà décrite à la réduction de l'acide titanique par l'aluminium en grains, nous avons obtenu les résultats suivants :

1° Les expériences ne donnent des résultats intéressants que si l'on a eu soin de porter, au préalable, le mélange à la température de 600°, et si, de plus, l'on vient, aussitôt après l'inflammation, à projeter un jet d'oxygène à la surface ;

2° Trois expériences seulement donnent des résultats; ce sont celles qui correspondent à la formation théorique de $TiAl^2$, $TiAl^3$ et $TiAl^4$;

3° Les culots et cristaux que l'on obtient contiennent des proportions assez fortes d'azoture et d'oxyde de titane. Les analyses ne peuvent donc fournir que des résultats approximatifs;

4° La première de ces expériences a donné des cristaux épars dans la masse.

Le rapport du titane et de l'aluminium montre cependant nettement que le produit correspond à la formule Ti^2Al^3. Pour obtenir ces cristaux en assez grandes quantités, il faut partir des proportions suivantes :

Acide titanique............	1kg,805
Aluminium................	1 ,195

5° L'expérience correspondant à $TiAl^4$, dans laquelle on emploie le mélange :

Acide titanique............	1kg,090
Aluminium................	1 ,910

donne un culot extrêmement bien cristallisé, dans lequel on note des cristaux lamellaires.

Ce culot limé, tamisé, traité par KOH étendu, donne une poudre cristalline correspondant à la formule $TiAl^4$.

Il semble donc y avoir deux combinaisons correspondant aux formules : Ti^2Al^3 et $TiAl^4$.

Les propriétés de ces corps n'ont pu être étudiées d'une façon précise, puisqu'on les obtient à l'état impur.

Cependant on peut dire qu'ils ne sont attaqués par l'oxygène et l'eau qu'à haute température. L'acide chlorhydrique et l'eau régale les dissolvent facilement; le chlore les attaque rapidement au rouge.

Métallographie. — Seul le composé $TiAl^4$ a pu être observé.

On obtient par polissage en bas-relief de grands cristaux très brillants et entourés de l'eutectique $TiAl^4$-Al.

Étude industrielle. — M. Moissonnier signale, dans son livre sur *l'Aluminium*, un alliage trouvé dans le commerce et analysé par M. Lévy. Il avait la composition suivante :

Al........................	69,63 0/0
Ti........................	30,37 0/0

M. Moissonnier ajoute : « Il se présentait en groupements cristallisés, dans lesquels on reconnaissait au microscope des angles de 90° ; les lamelles miroitantes étaient très fragiles et très conductrices de la chaleur. Aussi ne pouvait-on songer à les utiliser pour la fabrication des objets en métal destinés à un usage quelconque. »

ALLIAGES D'ALUMINIUM ET DE PLOMB

En étudiant les alliages d'aluminium, nous avions cru remarquer que ces deux métaux ne pouvaient s'allier, et nous avons signalé ce point dans notre thèse. Un travail de M. Pécheux, présenté à l'Académie des Sciences, le 25 avril 1904, semble prouver que notre observation n'est pas entièrement juste. En effet les résultats obtenus ont été les suivants :

1° Tous les mélanges renfermant moins de 90 0/0 d'aluminium ont donné au moule trois lingots superposés, séparés par liquation : en bas, du plomb ; au dessus, un alliage plomb-aluminium ; en haut, de l'aluminium.

La teneur en aluminium du lingot intermédiaire varie de 90 à 97 0/0 ;

2° Il a pu être préparé des alliages à 93, 95 et 98 0/0 de plomb.

Deville a signalé que certains alliages plomb-aluminium étaient inattaquables par l'eau à 100° ; Campbell et Mathews d'une part, Heycock et Neville d'autre part, ont fait quelques recherches sur ces alliages, mais sans apporter grands résultats.

ALLIAGES D'ALUMINIUM ET DE BISMUTH

Nous avons fait sur ces alliages la même remarque que pour les alliages aluminium-plomb. M. Pécheux a pu préparer (*Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 13 juin 1904) des alliages renfermant moins de 30 0/0 bismuth. Au dessus, il y a séparation en trois lingots.

ALLIAGES D'ALUMINIUM ET DE SILICIUM

Ces alliages ont été étudiés seulement au point de vue industriel par M. Minet. Dans son très intéressant *Rapport à la Commission des méthodes d'essais*, M. Baclé dit que, pour des teneurs en silicium variant de 6 à 10 0/0, ces alliages présentent une résistance de 25 kilogrammes environ avec un allongement inférieur à 10 0/0. Un recuit à 400° modifie complètement ces propriétés : la résistance de 23 kilogrammes s'abaisse à 15 kilogrammes, et l'allongement peut s'élever légèrement. Il est probable que le métal cité était brut de laminage dans le premier cas.

ALLIAGES D'ALUMINIUM ET D'ARGENT

Étude théorique. — M. H. Gautier a déterminé la courbe de fusibilité des alliages aluminium-argent (*fig.* 202). Il a trouvé que cette courbe se compose de trois branches séparées par deux points anguleux correspondant aux alliages eutectiques correspondant l'un à 70 0/0 d'argent et fondant à 570°, l'autre à 90 d'argent et fondant à 740°. L'une des branches paraît avoir un maximum indiquant la combinaison Ag^3Al^4.

Étude industrielle. — Il est reconnu que l'argent augmente la charge de rupture et la dureté de l'aluminium. Voici d'abord, d'après M. Moissonnier, les propriétés de certains de ces alliages :

COMPOSITION Al	COMPOSITION Ag	DENSITÉ MESURÉE	DENSITÉ CALCULÉE	RÉSISTANCE	ALLONGEMENTS POUR 100
100	0	2,67	»	18kg	3 0/0
95	5	2,79	2,76	24kg	3 0/0
90	10	2,90	2,89	31kg	2 0/0

Il est bien à noter que ces essais ont été faits sur des tôles laminées et non recuites. Ceci explique les faibles allongements et les charges de rupture relativement élevées, mais n'a que peu d'importance pour ce qui est du rôle même de l'argent, si l'on admet le même écrouissage.

Parmi les alliages d'aluminium et d'argent, il en est un qui est déjà fort employé pour la construction des appareils de physique et notamment des fléaux de balances; il est formé de :

Al.................. 97 0/0
Ag.................. 3 0/0

Il s'altère peu sous l'action des agents atmosphériques; il est très blanc et suffisamment dur.

L'alliage

Al.................. 95 0/0
Ag.................. 5 0/0

a été proposé à différentes reprises pour la fabrication de la monnaie divisionnaire.

ALLIAGES D'ALUMINIUM ET D'OR

MM. Heycock et Neville ont étudié ces alliages au point de vue théorique. Le diagramme 203 représente la courbe de fusibilité de ces alliages. La figure 204 donne à une plus

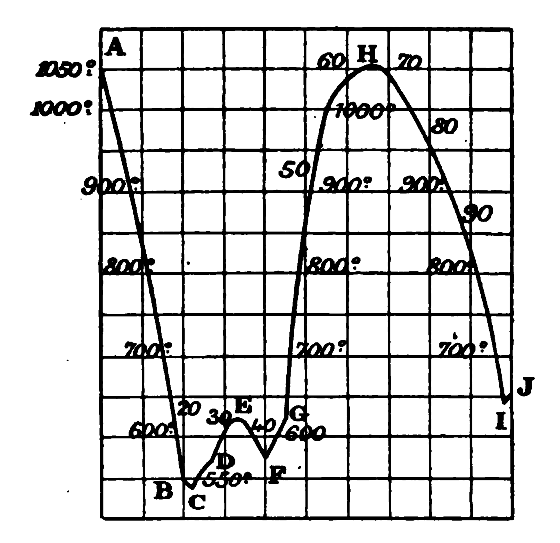


Fig. 203. — Courbe de fusibilité des alliages aluminium-or (Heycock et Neville).

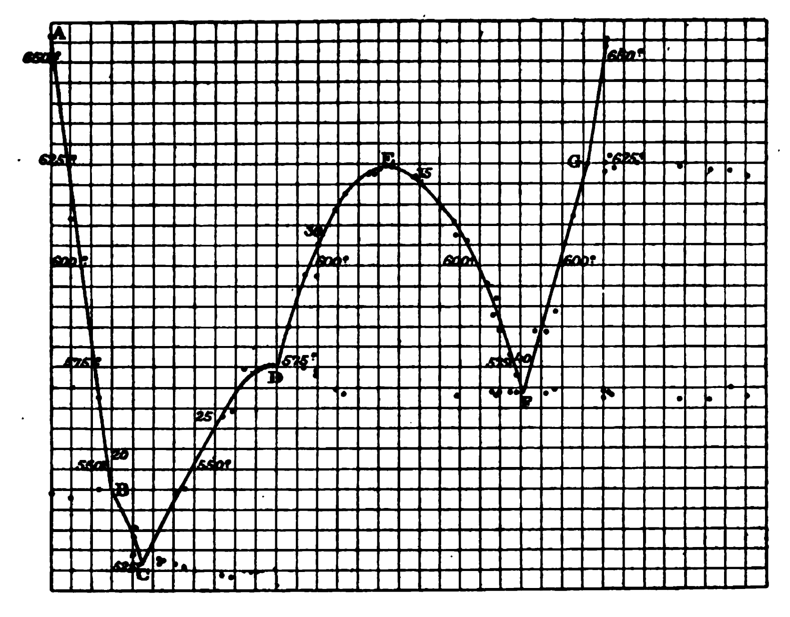


Fig. 204. — Détail d'une partie de la courbe ci-dessus.

grande échelle la partie comprise entre 17 et 44 atomes d'aluminium et indique les différents points de transformation observés autres que les points de commencement de solidification (liquidus).

De A à B, on a une ligne droite; de plus, tous les alliages correspondant à cette partie ont un second point (fin de solidification) à 545° environ (*fig.* 204). De B en C, nouvelle ligne; en C, eutectique fondant à 525°. Pour les alliages correspondant à CD, on trouve deux points, dont l'un est fixe.

On a ensuite une branche DEF avec maximum en E, eutectique en F.

Pour certains alliages de cette branche, on trouve un point de transformation.

L'aluminium continuant à augmenter, on a d'abord une droite FG, puis une courbe GHI présentant un maximum en H, un minimum en I et, enfin, une droite très courte IJ aboutissant au point de fusion de l'aluminium.

De cette courbe, MM. Heycock et Neville ont déduit qu'il existait probablement les composés :

Au^4Al, qui se déposerait à peu près pur en BC;

Au^5Al^2 (ou Au^8Al^3), qui se déposerait à peu près pur en D;

Au^2Al, qui se déposerait pur en E;

$AuAl^2$, substance d'un beau pourpre, déjà signalé par Roberts-Austen, qui se dépose en H.

Enfin, le composé AuAl existe peut-être; il correspondrait au point G.

L'examen micrographique fait par MM. Heycock et Neville a complètement confirmé les résultats précédents.

Le composé Au^4Al se présente en baguettes d'un jaune pâle.

Le composé $AuAl^2$ est attaqué par l'acide chlorhydrique.

Enfin le corps que l'on croit être AuAl se présente en cristaux blancs.

Étude industrielle. — Le seul alliage d'aluminium contenant de l'or qui ait eu quelque succès industriel est le *bronze or-aluminium*, dont la composition est :

Al.....................	22
Au.....................	78

Il est dû à M. Hunt, qui l'a lancé pour la bijouterie ; il possède une superbe couleur pourpre :

Il faut citer encore un alliage plus complexe :

Al................	7,5 0/0
Cu................	90 0/0
Au................	2,5 0/0

Il est connu sous le nom d'or de Nuremberg et utilisé en bijouterie.

ALLIAGES D'ALUMINIUM ET DE CALCIUM

Ces alliages, dans lesquels la teneur en métal alcalino-terreux peut atteindre une proportion très élevée, jouissent de propriétés spéciales qui leur assurent quelques applications dans l'industrie. On sait, en effet, que le calcium, par exemple, offre la propriété de former avec l'hydrogène, l'azote et l'oxygène des combinaisons stables à une température élevée, ce qui en fait un agent précieux de réduction dans certains cas et permet, dans d'autres cas, d'absorber les gaz comme l'hydrogène et l'azote.

Il en est ainsi du baryum, du strontium et du lithium ; ce que nous dirons ici pour le calcium doit s'entendre également pour ces autres métaux.

Mais la préparation du calcium offre des difficultés qui en rendent l'emploi difficilement accessible à l'industrie. MM. Poulenc et Meslans ont cherché à obtenir les mêmes avantages en préparant des alliages de ce métal plus faciles à produire.

Ils obtiennent des alliages de calcium avec de l'aluminium, du cuivre, du fer, dans lesquels la proportion du métal alcalino-terreux peut être augmentée dans des limites étendues.

Le procédé de fabrication consiste à traiter par électrolyse les sels fondus des métaux alcalino-terreux et, en particulier, les chlorures en employant une cathode fondue d'aluminium, de cuivre ou de fer.

Voici, par exemple, le dispositif le plus employé :

On prend un récipient de fonte dont les parois latérales sont recouvertes de garnitures réfractaires et en même temps isolantes et dont le fond est nu.

On y fond une certaine quantité d'aluminium que l'on recouvre ensuite de chlorure de calcium également fondu.

Une anode de charbon plonge dans l'électrolyse, et le récipient est relié au pôle négatif de la source d'électricité.

L'électrolyse se poursuit très aisément, et le calcium isolé à la cathode fondue se combine directement à l'aluminium. On règle à volonté la teneur en calcium de l'alliage en prolongeant plus ou moins l'électrolyse.

Un grand nombre d'essais ont porté sur des alliages contenant 25 à 30 0/0 de calcium, mais ce chiffre peut être facilement accru. On a pu obtenir ainsi des alliages très riches en calcium, qui viennent flotter à la surface du bain de sel fondu.

Il est facile de donner à l'opération une marche continue.

En général l'action électrolytique suffit à maintenir en fusion le chlorure et l'aluminium ; mais on peut, si besoin en est, y ajouter l'action d'une source de chaleur extérieure.

L'opération s'effectue de la même façon pour les alliages de baryum, strontium et lithium avec l'aluminium ou avec le cuivre.

Pour obtenir les alliages des mêmes métaux avec le fer, on se sert de préférence, à cause de la difficulté de maintenir le fer à l'état de fusion, d'un four électrique à cathode inférieure sur la sole duquel on fond le métal, puis on ajoute le chlorure alcalino-terreux fondu, et on électrolyse en écartant convenablement l'anode supérieure de charbon.

L'alliage aluminium-calcium à 20 0/0 est cassant et offre une texture cristalline très brillante ; il décompose l'eau lentement

en provoquant un dégagement d'hydrogène. Chauffé dans un courant d'hydrogène ou d'azote, il absorbe ces gaz en donnant un hydrure ou un azoture de calcium.

Les alliages plus riches en calcium agissent naturellement avec une plus grande énergie.

ALLIAGES COMPLEXES D'ALUMINIUM

Outre les divers laitons que nous avons étudiés précédemment, il faut citer un certain nombre d'alliages d'aluminium, dont la complexité ne peut guère s'expliquer. Nous avons choisi l'ordre chronologique de leur apparition.

En 1894, M. de Susini prend un brevet pour un certain nombre d'alliages dont quelques-uns paraissent intéressants. Voici leurs compositions et leurs propriétés :

COMPOSITION				CHARGE DE RUPTURE	
Al	Mn	Cu	Zn	LAMINÉ ET ÉCROUI	LAMINÉ ET RECUIT
97	1	1,5	0,5	21	18
95	1,5	2,5	1,0	27	24
92	2	4,5	1,5	30	26

Le brevet ne donne aucune indication sur la façon dont est introduit le manganèse ni sur les allongements des alliages.

La même année, M. Partin crée une nouvelle catégorie d'alliages à laquelle il donne le nom de *Partinium*. Voici, d'après le brevet même, comment il procède :

Il forme d'abord un premier alliage en fondant :

Cu	78
Sn	20

avec 2 parties d'arséniate de potasse.

On mélange le résultat de cette opération, que l'on a eu soin de pulvériser, avec 1 partie de tungstène et 3 parties d'antimoine. On place le mélange dans un linge enduit d'une couche de terre à four délayée dans l'eau, et le tout est mis dans un creuset et chauffé au rouge vif pendant douze heures. L'alliage résultant est de nouveau pulvérisé et ajouté à l'aluminium en fusion dans les proportions de 4 à 10 0/0.

Pour augmenter la ténacité du métal sans modifier son poids spécifique (toujours d'après le brevet), on supprime le tungstène et l'antimoine à la première formule, et on remplace ces deux corps par la même proportion de magnésium en poudre. Pour faciliter la combinaison, ajoute l'inventeur, on additionnera l'alliage de tartrate de potasse calciné et de chlorure de sodium.

Enfin le brevet se termine en donnant la recette d'une soudure d'aluminium, qui serait composée de :

Zn	60
Sn	30
Ni	4
Cu	4

le tout fondu avec 2 0/0 d'arséniate de potasse.

Au mois d'avril de la même année 1894, M. Roman indique l'alliage suivant :

Al	98
Cu	0,375
Sn	0,105
Sb	1,442
W	0,038

Il a soin d'ajouter que l'on peut substituer le manganèse ou le nickel au cuivre, à l'étain et à l'antimoine et l'employer dans les mêmes proportions. On mélange les métaux dans l'ordre indiqué en ajoutant une petite quantité d'aluminium à chacun d'eux pour agir comme fondant.

Nous pensons que la seule chose remarquable de ce brevet

est la précision avec laquelle il a été pris ; on y garantit la troisième décimale.

Le brevet pris, le 29 octobre 1894, par MM. de Susini et Langlois, a en vue la fabrication d'alliages à haute teneur en cuivre et contenant de l'aluminium et du tungstène.

La seule caractéristique de ces alliages donnée par leurs auteurs consiste dans l'allongement, qui varie de 3 à 40 0/0.

Il y a huit types fondamentaux dont les compositions indiquées dans le tableau suivant :

TYPES	Cu	Al	W	Ph
1	90	5	4,5	0,5
2	89	6	4,5	0,5
3	88	7	4,5	0,5
4	87	8	4,5	0,5
5	86	8	5,5	0,5
6	85	9	5,5	0,5
7	83	10	6,5	0,5
8	95	3	1,5	0,5

On voit que ce sont des alliages lourds.

Voici, d'ailleurs, les détails donnés sur leur préparation.

1° On allie le tungstène au cuivre. Comme le tungstène pur est très cher, dit le brevet, on réduit le minerai en présence de cuivre électrolytique pur, par le charbon dans un creuset chauffé dans un four.

On obtient un culot renfermant 50 0/0 de cuivre et 50 0/0 de tungstène avec des traces d'autres métaux ;

2° On place dans un creuset la quantité de cuivre nécessaire pour obtenir un des types ci-dessus indiqués avec la quantité voulue d'alliage cuivre-tungstène :

3° Lorsque ce mélange est fondu au rouge blanc, on ajoute l'aluminium ;

4° On ajoute après brassage 0,5 0/0 de phosphore pour affiner et purifier.

Les propriétés mécaniques et les usages de ces alliages ne sont point indiqués.

En 1895, M. Combes prend un brevet pour l'addition de nickel aux alliages aluminium-cuivre.

En janvier 1896, M. Hélouis prend un brevet sur la réduction de l'acide vanadique par l'aluminium et la préparation par ce moyen d'alliages aluminium-vanadium. Il s'empresse de faire breveter également la possibilité d'incorporer le vanadium au fer, au cuivre, etc., par simple fusion au creuset, en utilisant ces alliages.

En 1896, sont brevetés par M. Cothias des alliages formés d'aluminium, de cuivre et d'étain auxquels on peut ajouter, dit le brevet, un peu de manganèse, titane, ou de tungtène à l'état de phosphure pour augmenter la dureté.

Voici les compositions citées dans le brevet :

TYPES	Al	Cu	Sn	Zn	OBSERVATIONS
1	10	180	150	0	Pour coussinets.
2	230	80	190	500	— pièces légères.
3	400	40	200	360	Densité inférieure à 5.
4	880	40	80	0	— — à 3.

En décembre 1896, M. Secretan fait breveter une série d'alliages qui semblent être étudiés fort sérieusement. Ils sont constitués par du cuivre, de l'aluminium, du nickel et du phosphore. Ce dernier corps est ajouté à l'état de phosphure de cuivre ou d'aluminium ; le nickel est introduit sous forme d'alliage de cuivre et de nickel ou d'alliage d'aluminium et de nickel à 0,01 au maximum.

Le principal alliage cité a pour composition :

Cu	95
Al	4 à 5
Ph	0,0005 (maximum)
Ni	0,01 —

Le 29 avril 1899, Mach fait breveter les alliages aluminium-magnésium, dont nous parlons longuement dans le chapitre suivant.

C'est aussi en 1899 que *The Albradium Syndicate Limited* brevète un alliage obtenu de la façon suivante :

On fond d'abord 50 à 90 parties de cuivre, 2 à 20 parties de nickel, 5 à 25 parties de zinc, et 2 à 10 parties de phosphore. On prend 100 parties d'aluminium, et on y ajoute 5 à 25 parties de l'alliage précédent. Ces produits seraient fort employés en Angleterre.

MM. Chassereau et Mourlon ont breveté, ces dernières années, l'alliage suivant :

Al....................	900
Bi....................	50
Fe....................	25
Ni....................	25

D'après le brevet, on aurait une résistance extraordinaire, une inoxydabilité remarquable, et la soudure de cet alliage serait aisée.

Il faut encore citer quelques brevets intéressants :

M. Bernard a fait breveter de nouveaux alliages d'aluminium obtenus par la méthode suivante :

Objet du brevet. — Alliages d'aluminium obtenus par électrolyse en traitant directement et sans purification préalable les minerais d'aluminium (bauxites rouges et blanches).

Description. — Parmi les alliages d'aluminium, les uns, comme les ferro-aluminiums, les ferro-silicium-aluminiums, le silicium-aluminium, où la teneur en silice est supérieure à 10 0/0, sont employés en métallurgie. Les autres où la teneur en silice est inférieure à 10 0/0 peuvent être employés en mécanique (à l'état laminé ou étiré) à la place de l'acier, en raison de leur grande résistance et de leur légèreté. Les résultats obtenus avec ces divers alliages sont dus à deux causes : 1° à leur texture moléculaire ; 2° aux proportions suivant lesquelles leurs divers éléments entrent dans leur composition [1].

1. C'est bien là ce qui différencie tous les alliages, il nous semble.

1° *Alliages appliqués à la métallurgie du fer, affinage de l'acier et de la fonte :*

TYPES	ALUMINIUM	FER	SILICIUM
1	78 0/0	25	5
2	—	20	10
3	—	15	25
4	—	10	20
5	—	10	10
6	—	traces	30

2° *Alliages mécaniques.* — Dans cette seconde série, la proportion d'aluminium est plus forte : elle atteint 90 0/0.

TYPES	ALUMINIUM	SILICIUM	FER
1	92 0/0	6,75	1,25
2	90	9,25	0,75
3	90	10	traces

Les meilleurs résultats de résistance sont obtenus avec les alliages où la proportion de fer est très faible et celle du silicium voisine de 10 0/0. Au-delà de cette teneur, les alliages sont cristallins et ne peuvent guère être employés.

La densité des alliages au silicium est voisine de celle de l'aluminium.

Alzugaray a pris en Angleterre un brevet pour les alliages aluminium et antimoine.

Objet du brevet. — Procédé de préparation de nouveaux alliages au moyen de l'aluminium et de l'antimoine.

Description. — Ces alliages s'obtiennent soit en fondant ensemble les composants à l'état métallique, en proportions voulues, soit en fondant des oxydes de ces métaux éventuellement avec la quantité de charbon nécessaire pour les réduire.

L'aluminium peut être ajouté à l'antimoine fondu ou *vice versa*.

En fondant de l'antimoine et brassant avec une tige d'aluminium ou, inversement, en brassant de l'aluminium fondu avec une tige d'antimoine, on obtient un alliage renfermant environ :

Aluminium	18,37
Antimoine	81,63

qui est totalement infusible aux plus hautes températures qu'on puisse atteindre avec le fourneau Perrot[1].

Un brevet d'Hugo-Salbiski se résume comme suit :

Objet du brevet. — Procédé de préparations d'alliages blancs, tenaces et malléables, à base d'aluminium consistant à fondre ce métal avec des alliages de nickel ou de cobalt, avec de l'étain dont le point de fusion est à peu près à la même température que l'aluminium, et avec du cadmium soit pur, soit allié à de l'étain ou à de l'aluminium.

Description. — En raison de l'énorme écart de la température entre le point de fusion de l'aluminium et celui du cobalt et du nickel, on n'obtient directement qu'avec peine des alliages homogènes entre ces métaux :

L'auteur a réussi à former de bons alliages en employant le cobalt ou le nickel sous forme d'alliages avec l'étain composés de telle sorte que leurs températures de fusion se rapprochent de celle de l'aluminium. L'alliage à parties égales de nickel et d'étain fond vers 800°. La ténacité de ces alliages, celle du fer étant représentée par 1000[2], est, pour les compositions en 100 parties :

ALUMINIUM	NICKEL AU Co	ÉTAIN	CADMIUM	TÉNACITÉ
90	1	5	4	580
95	1	1	3	442
96 1/2	0,5	0,5	2,5	380

1. Voir plus haut la constitution des alliages antimoine-aluminium.
2. L'auteur de ce brevet aurait mieux fait d'indiquer la valeur réelle de cette résistance.

On fond d'abord l'aluminium avec l'alliage nickel-étain ou cobalt-étain, et on ajoute ensuite le cadmium soit pur, soit allié à de l'étain ou à de l'aluminium.

Les alliages blancs ainsi obtenus sont durs, résistants à l'écrasement; ils se laissent bien forer, tourner, étirer en fils et polir.

Adderbrocke a breveté un alliage aluminium-étain-nickel-cuivre :

Aluminium..............	92 parties
Nickel..................	4 —
Étain....................	3 —
Cuivre..................	1 —

Le nickel est chauffé à part au rouge blanc, puis additionné d'une partie d'aluminium; les deux métaux se combinent avec incandescence. On ajoute alors le reste de l'aluminium préalablement fondu à part, puis l'alliage contenant l'étain et le cuivre dans la proportion voulue. L'alliage est coulé en lingots que l'on refond pour l'usage. En réduisant la proportion de nickel à 1 1/2 0/0 et l'étain dans le même rapport, on obtient un alliage plus malléable.

Pigeonneau a donné le moyen d'obtenir des alliages légers d'aluminium.

Objet du brevet. — Procédé de préparation d'un certain nombre d'alliages d'aluminium pouvant remplacer ce métal ou pouvant servir à la soudure.

Description. — 1° Alliage formé avec :

Nickel...........	4 parties
Aluminium......	90 —
Fer..............	1 ou 2 parties

Cet alliage s'obtient à 1.080°. Celui obtenu avec 1 partie de fer est très dur; il se lamine et peut subir un martelage énergique ; il est très malléable et inoxydable; sa dureté est très grande;

2° Alliage formé avec :

Aluminium	85 parties
Étain	10 —
Nickel	4 —
Ferro-nickel	2 —

Il se travaille à la lime; il est cassant ;

3° Alliage composé de :

Aluminium	85 parties
Étain	15 —
Nickel	2 —

4° Alliage composé de :

Aluminium	90 parties
Étain	10 —
Nickel	3 —

5° Alliage composé de :

Aluminium	90 parties
Étain	10 —
Nickel	4 —

Les trois derniers alliages sont inoxydables, se soudent à eux-mêmes ou à l'aluminium ou d'autres métaux avec une soudure formée de :

Argent	7 parties
Zinc	7 —
Étain	5 —

pour soudure tendre, ou :

Argent	5 parties
Zinc	8 —
Étain	5 —

pour soudure forte.

M. Spery a donné la composition d'un alliage nommé argent-

aluminium et employé pour certaines parties des machines à écrire :

Cu	57 0/0
Ni	20 0/0
Zn	20 0/0
Al	3 0/0

On voit que c'est un alliage lourd.

Carl Bery a fait aussi breveter certains alliages qui pourraient présenter quelque intérêt.

On vient de lancer (Bubbel, *Electro-Chemical Industry*, II, 1904) un nouvel alliage d'aluminium renfermant de 0,4 à 0,7 0/0 de phosphore. Connu sous le nom de *météroïte*, il donnerait de bons moulages; il possède la même densité que l'aluminium. Il serait utilisé pour la fabrication de fils, qui posséderaient la même conductibilité que le métal pur, mais seraient beaucoup plus résistants aux agents atmosphériques.

M. Richards cite comme le plus dur parmi les alliages légers d'aluminium un alliage quadruple d'aluminium, de cuivre, de nickel et de manganèse.

Enfin l'alliage d'aluminium breveté le plus récemment consiste dans un mélange de :

Al	200
Co	100
Ferro-silicium (?)	200
Ag	75

On fond en présence de 50 parties d'acide silicique. Le produit obtenu sert de matière première pour la préparation d'alliages d'aluminium; les quantités introduites varient avec la dureté que l'on veut obtenir.

CONCLUSIONS

De tous ces brevets extrêmement complexes, de toutes ces compositions dont certaines paraissent des plus fantaisistes, qu'est-ce que l'industrie conservera?

La question est trop récente pour être entièrement résolue, et c'est bien pour cela que nous avons tenu à citer des brevets.

Toutefois des indications assez nettes semblent se dégager des recherches déjà faites; nous pouvons les résumer en disant que, parmi les alliages dits légers, ceux de cuivre et surtout ceux de manganèse semblent les plus intéressants. L'introduction du phosphore dans ces alliages est, de plus, très logique; il y jouera, en effet, le rôle de réducteur, si important vis-à-vis d'alliages aussi oxydables.

Quoique les brevets sur ce sujet abondent (nous n'avons cité que les plus caractéristiques), il est certain qu'il reste beaucoup à faire et que le champ des alliages d'aluminium offre encore de nombreuses parties inexplorées dont on saura, sans doute, tirer quelques résultats industriels intéressants, surtout si des recherches scientifiques servent de principal guide.

Le seul but que l'on peut se proposer dans ces alliages légers d'aluminium, c'est l'incorporation *à faible dose* d'un élément qui améliore autant que possible les propriétés mécaniques, sans augmenter beaucoup la densité. Or, parmi les propriétés mécaniques, il en est une qui est très importante dans l'état actuel de la question de l'emploi de l'aluminium, c'est la facilité de travail. Il faut pour cela que le métal soit durci. Ceci est obtenu au moyen d'éléments qui entrent en solution dans l'aluminium, tel que le fer, ou qui forment avec lui un eutectique qui, en quantité assez faible, englobe les grains du métal : c'est le cas du cuivre.

Mais le cas de solutions solides semble être le plus intéressant. Car il donne des propriétés mécaniques plus progressives que toute autre constitution.

1. Voir au chapitre XXVIII.

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE XXII

TRAITÉS GÉNÉRAUX OU ÉTUDES D'ENSEMBLE

Guillet, Thèse de doctorat, 1902, Renouard, éditeur (*Étude chimique*) ; — *Génie civil*, t. LI, 23, 24, 25, 26, 1902 (*Généralités*) ; — *Bulletin de la Société d'Encouragement*, août 1902 (*Étude chimique*) ; — *Principes d'électrochimie et d'électro-métallurgie*, Baillière, éditeur.

Lejal, *l'Aluminium*, Baillière, éditeur (*Généralités*).

Minet, *l'Aluminium*, Bernard Tignol, éditeur (*Généralités*).

Moissan, *le Four électrique* (Steinheil, éditeur) (*Id.*).

Moissonnier, *l'Aluminium*, Gauthier-Villars, éditeur (*Id.*).

Schnabel, *Métallurgie des petits métaux*, Bérenger, éditeur (*Id.*).

ALUMINIUM-FER

Crace Colvert et Johnson, *Annales de Chimie et de Physique*, t. XLV, p. 459 (*Étude chimique*).

Knab, *Traité des Alliages métalliques*, Dunod, éditeur.

Roberts-Austen, *Institution of Mechanical Engineers*, 1895 (*Fusibilité*).

Wöhler et Michel, *Ann. Chem. Pharm.*, t. CXV, p. 102 (*Étude chimique*).

ALUMINIUM-ÉTAIN

Bourbouze, *Bulletin de la Société d'Encouragement*, 25 juillet 1884 (*Types industriels*).

Gautier, *Contribution à l'étude des Alliages métalliques*, p. 93 (*Fusibilité*).

Pécheux, *Comptes Rendus*, 9 mai 1904 (*Étude chimique*).

Shepherd, *Physical Chemistry*, XIII, 1904 (*Étude théorique*).

ALUMINIUM-ZINC

Debray, *Comptes Rendus*, XLIII, 926, 1856.

Heycock et Neville, *Journal of chemical Society*, LXXI, p. 383, 1877.

Hieze, *Jahresberichte*, 138, 1858.

Joule, *Journal of Chemical Society*, XVI, p. 378, 1863.

Louguinine and Schukareff, *Archives de Genève*, 4e série, XIII, 5, 1902.

Pécheux, *Comptes Rendus*, CXXXVIII, p. 1103, 1904.

Roland Gosselin, *Contribution à l'étude des Alliages métalliques*, p. 93 (*Fusibilité*).

ALUMINIUM-CADMIUM

Campbell et Mathews, *American Chemical Society*, III, p. 253, 1902.

Debray, *Comptes Rendus*, XLIII, p. 926, 1856.

Deville, *Bulletin de la Société de Chimie*, p. 157, 1859.

Franck, *Chem. Zeit.*, XXII, 236, 1898.

ALUMINIUM-ANTIMOINE

Gautier, *Contribution à l'étude des Alliages métalliques*, p. 93 (*Fusibilité*).
Pécheux, *Comptes Rendus*, 20 juin 1904 (*Etude chimique*).
Wright, *Journal of the Chemical Industry*, 1892, p. 493 (*Id.*).

ALUMINIUM-NICKEL

Campbell et Andrews, *American Chemical Society*, mars 1902 (*Propriétés*).
Wöhler et Michel, *Annalen der Chem. Pharm.*, t. CXV, p. 102 (*Étude chimique*).

ALUMINIUM-CHROME

Wöhler et Michel, *Annalen der Chem. und Pharm.*, 1860.

ALUMINIUM-PLOMB, ALUMINIUM-BISMUTH

Campbell et Mathews, *Bulletin de la Société de Chimie*, XXVIII, 627, 1902, et *American Chem. Soc.*, XXIV, 253, 1902.
Pécheux, *Comptes Rendus*, 25 avril 1904 (*Étude chimique*) ; — *Comptes Rendus*, 13 juin 1904 (*Id.*).
Tissier, *Comptes Rendus*, XLIII, 1187, 1856.

ALUMINIUM-SILICIUM

Baclé, *Rapport à la Commission des méthodes d'essais*, 1892 (*Propriétés*).

ALUMINIUM-ARGENT, ALUMINIUM-OR

Gautier, *Contribution à l'étude des Alliages* (Société d'Encouragement), p. 93 (*Fusibilité*).
Heycock et Neville, *Philosoph. Transactions Royal of Society*, 1900, t. II (*Étude théorique*).
Stead, *Iron and Steel Institute*, 1898 (*Forme cristalline*).

ALLIAGES COMPLEXES

Voir les brevets.
Bubbel, *Electro-chemical Industry*, II, 1904.
Campbell et Mathews, *American Chemic. Journ.*, 3, 253, 1902.

CHAPITRE XXIII

ALLIAGES DE MAGNÉSIUM

Les principaux alliages de magnésium qui ont été étudiés au point de vue théorique sont :

1° Les alliages cuivre-magnésium ;
2° Les alliages aluminium-magnésium ;
3° Les alliages cadmium-magnésium ;
4° Les alliages zinc-magnésium ;
5° Les alliages étain-magnésium ;
6° Les alliages plomb-magnésium.

De tous ces alliages, les seuls utilisés dans l'industrie sont les alliages aluminium-magnésium.

ALLIAGES DE CUIVRE ET DE MAGNÉSIUM

Parkinson a préparé (*Chemic. Society*, 2e série, t. V, p. 117) un alliage à 20 0/0 environ de magnésium qui était de couleur rouge or, qui s'oxydait lentement et qui était très cassant. On sait, d'ailleurs, depuis fort longtemps, que 1 0/0 de magnésium rend le cuivre cassant et que l'on peut pulvériser au mortier l'alliage renfermant 15 0/0 de magnésium.

M. Boudouard (*Bulletin de la Société d'Encouragement*, août 1903) a donné une étude très complète de ces alliages.

Il a déterminé tout d'abord la courbe de fusibilité. Cette courbe présente (*fig.* 205) trois maxima (550°, 586° et 915°) et quatre minima (475°, 540°, 575° et 890°). On note que les alliages renfermant moins de 75 0/0 de cuivre sont extrêmement fusibles; leur point de solidification est inférieur à celui du magnésium.

Quant aux trois maxima, ils correspondent aux trois combinaisons : $CuMg^2$, CuMg et Cu^2Mg.

M. Boudouard a noté les quelques propriétés mécaniques suivantes : le magnésium, renfermant 10 0/0 de cuivre, est encore malléable ; au-delà de 10 0/0, il devient cassant, et la fragilité est d'autant plus grande que la teneur en cuivre est plus élevée, cela jusqu'à 70 0/0 de cuivre. A cette teneur, l'alliage est brisé entre les doigts. Puis la fragilité va en diminuant jusqu'au cuivre pur. A 90 0/0 de cuivre, l'alliage se brise encore sous le choc du marteau.

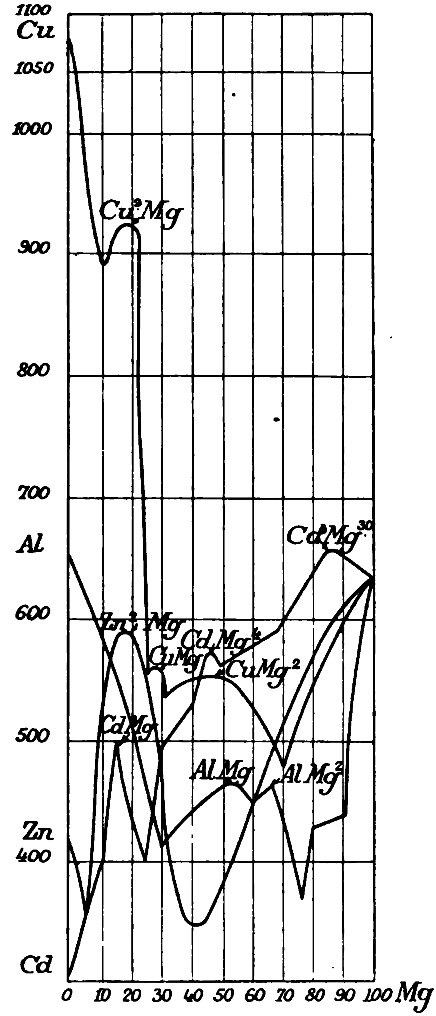


Fig. 205. — Courbes de fusibilité des alliages de magnésium (Boudouard).

Il y a une certaine analogie entre les propriétés de ces alliages et celles des alliages aluminium-cuivre, sauf toutefois pour ceux qui renferment plus de 90 0/0 de cuivre qui, nous l'avons dit, forment le bronze d'aluminium et sont très malléables.

Les alliages cuivre-magnésium sont blancs jusqu'à 70 0/0 de cuivre. Au delà, ils sont d'une couleur jaune tendant de plus en plus vers le rouge, au fur et à mesure que la teneur en cuivre augmente.

Le changement de couleur correspond à la formation du composé Cu^2Mg.

Pour étudier la micrographie de ces alliages (Album, Pl. XCVIII, Phot. 392 à 395), M. Boudouard a procédé par la méthode, que nous avons déjà décrite, de la superposition des deux métaux.

Il a trouvé, à partir de la zone inférieure, les parties suivantes :

1° Une zone de couleur rouge;

2° Une zone de couleur jaune d'or, à la ligne de séparation;

Aux environs de la ligne de séparation de ces deux régions, qui est excessivement nette, on remarque une assez grande quantité de points rouges, qui semblent être des inclusions de cuivre noyées dans un eutectique;

3° Une zone de couleur jaunâtre, constituée presque uniquement par des cristaux ayant une direction sensiblement verticale et de forme digitée;

4° Une masse de cristaux très longs et très volumineux, noyés dans un eutectique abondant;

5° De belles arborescences en feuilles de fougère qui se continuent très irrégulièrement et finissent par disparaître dans la partie supérieure du culot.

Ces différentes sortes de cristaux correspondent aux trois combinaisons définies que fait prévoir la courbe de fusibilité : Cu^2Mg, CuMg et $CuMg^2$; quant à la zone inférieure de couleur rouge, si nettement séparée du reste du culot, elle doit être constituée par du cuivre sensiblement pur, qui s'est solidifié brusquement au contact du magnésium froid, au moment de son introduction. En attaquant fortement la surface polie d'un culot contenant 90 de cuivre et 10 de magnésium par de l'acide nitrique à 10 0/0 et polissant ensuite graduellement, on voit se détacher, sur un fond noir, de très belles arbores-

cences constituées par la combinaison Cu^2Mg. L'examen d'un culot contenant 82,1 0/0 de cuivre a montré une structure cellulaire après simple polissage ; l'attaque à l'acide picrique ou à l'acide chlorhydrique n'a fait qu'exalter la couleur rouge du cuivre. Le culot 40 Cu-60 Mg, par simple polissage en bas-relief présente une belle cristallisation, formée, par des cristaux orientés dans toutes les directions et noyés au milieu d'un eutectique abondant ; ces cristaux constituent la combinaison $CuMg^2$. L'attaque au chlorhydrate d'ammoniaque donne les mêmes résultats. Par suite de l'extrême fragilité des culots contenant de 50 à 70 0/0 de cuivre, nous avons pu les polir pour faire l'examen micrographique dans le but d'obtenir la combinaison CuMg. Enfin M. Boudouard a pu isoler, par des moyens chimiques, les combinaisons indiquées.

L'alliage cuivre-magnésium est utilisé comme épurateur dans certaines fabrications, notamment dans la préparation des moulages de maillechort. Il y joue, en somme, le même rôle que le cupro-phosphore dans le bronze.

ALLIAGES D'ALUMINIUM ET DE MAGNÉSIUM

Quelques recherches très sommaires ont été faites sur ces alliages par Wöhler, d'une part, et Parkinson, d'autre part. Mais ces alliages attirèrent l'attention au moment où M. Mach prépara un produit renfermant 90 0/0 d'aluminium et 10 0/0 de magnésium, plus léger que l'aluminium et possédant quelques propriétés mécaniques intéressantes, surtout au point de vue de la facilité du travail.

M. Boudouard a appliqué à ces alliages les méthodes modernes d'investigation (*Bulletin de la Société d'Encouragement*, décembre 1901). Nous résumerons sa fort intéressante étude.

La courbe de fusibilité de ces alliages présente deux maxima

et trois minima (*fig.* 205). Elle accuse donc deux combinaisons :

$$AlMg^2 \text{ et } AlMg,$$

fondant, la première à 455°, la seconde à 462°.

Les trois eutectiques fondent à 356, 445 et 432°.

Entre 10 et 20 0/0 d'aluminium, la courbe est sensiblement parallèle à l'axe des x.

A première vue, il n'y aurait d'intéressants que les alliages contenant de 0 à 15 0/0, soit d'aluminium, soit de magnésium ; les autres sont tous fragiles. L'alliage le plus fragile est celui à 50 0/0 d'aluminium; il se brise entre les doigts.

L'étude micrographique (Album, Pl. XCIX, Phot. 388 à 391) a donné des résultats très nets :

Le composé AlMg apparaît, sous l'action d'une solution d'acide chlorhydrique à 10 0/0, sous forme de dendrites très irrégulières.

La combinaison $AlMg^2$ est mise en vue par l'attaque au chlorhydrate d'ammonium à 10 0/0; elle donne des cristaux arborescents très nets environnés d'un eutectique.

Mais le point le plus intéressant est le suivant : la micrographie montre nettement une combinaison autre que celles indiquées par la courbe de fusibilité; cette combinaison a pu être isolée, et elle apparaît en magnifiques dendrites dont quelques-uns rappellent les formes cristallines hexagonales de la glace; elle a pour formule Al^4Mg. Elle a pour densité 2,58; la densité de AlMg est 2,15; celle de $AlMg^2$, 2,03. Ces trois combinaisons ont pu, en effet, être isolées par des réactifs appropriés.

ALLIAGES DE MAGNÉSIUM ET DE CADMIUM

Ces alliages ont été étudiés par M. Boudouard (*Bulletin de la Société d'Encouragement*, août 1902). Parkinson avait déjà signalé qu'un alliage cadmium-magnésium renfermant 10 0/0 de magnésium était très brillant, très dur et très cas-

sant après sa préparation et devenait extrêmement brisant et terne après quelques mois.

La courbe de fusibilité (*fig*. 205) accuse trois maxima qui correspondent aux formules :

$$CdMg, \quad CdMg^4, \quad CdMg^{30}.$$

Ces combinaisons fondent à 500°, 560° et 650°.

On voit que la dernière est moins fusible que les métaux constituants.

On connaît déjà des exemples d'anomalies semblables données par les alliages d'antimoine-aluminium, et or-aluminium. La courbe de fusibilité des alliages magnésium-cadmium présente deux eutectiques fondant à 400° et 560°.

La micrographie (Album, Pl. CI, Phot. 396 et 397) a permis de mettre en vue les différentes combinaisons par l'attaque à l'acide azotique dilué.

La combinaison CdMg se présente en grands dendrites très nets.

Le composé $CdMg^4$ apparaît même par simple polissage bas-relief.

Quant à $CdMg^{30}$, on l'obtient en polyèdre à bords nets; mais rien ne prouve que ce soit bien la combinaison. D'après l'étude chimique faite par M. Boudouard, on aurait plutôt une solution solide de $CdMg^{30}$ et de Mg. Des faits semblables ont d'ailleurs été observés pour les alliages cuivre-antimoine; nous les avons étudiés en détail.

ALLIAGES DE ZINC ET DE MAGNÉSIUM

Parkinson avait obtenu en fondant le mélange :

Mg.................	90 0/0
Zn.................	10 0/0

un alliage très dur et très cassant dont la couleur est blanc d'étain.

L'étude complète des alliages magnésium-zinc a été faite par M. Boudouard (*Revue de Métallurgie*, octobre 1904).

La courbe de fusibilité (*fig.* 205) présente un maximum correspondant à la formule Zn^2Mg; cette combinaison fond à une température un peu supérieure à 570°. La courbe présente aussi deux eutectiques fondant à 355 et 332° et correspondant le premier à 5 0/0 de magnésium; le second, à environ 40 0/0.

Elle n'indique donc qu'une seule combinaison, tandis que la micrographie en indique deux bien nettes.

Métallographie (Album, Pl. CI, Phot. 398 et 399). — L'attaque à la potasse d'un alliage à 10 0/0 de magnésium et 90 0/0 de zinc laisse apparaître des cristaux blancs entourés de plages noires qui, à forts grossissements, apparaissent constitués par un eutectique. Les cristaux sont de formule Zn^2Mg.

L'examen d'un alliage à 50 0/0 de magnésium et autant de zinc laisse voir de belles arborescences qui correspondent à la combinaison $ZnMg^4$, non indiquée par la courbe de fusibilité.

Étude chimique. — M. Boudouard a pu isoler les deux combinaisons par des réactifs appropriés, l'acide chlorhydrique dilué à froid pour Zn^2Mg et une solution diluée de chlorhydrate d'ammoniaque à chaud pour le composé Zn^4Mg.

ALLIAGES DE PLOMB ET DE MAGNÉSIUM ET D'ÉTAIN ET DE MAGNÉSIUM

Ces alliages ont été étudiés au point de vue de la fusibilité par MM. Kournakoff et Stéphanoff, qui ont publié leurs recherches dans le *Bulletin de la Société russe de Physique et de Chimie*.

Ils ont trouvé que, pour ces deux séries d'alliages, les courbes présentent deux maxima correspondant à :

$PbMg^2$ et $SnMg^2$

MM. Heycock et Neville ont donné la courbe de fusibilité des alliages Pb-Mg.

ÉTUDE INDUSTRIELLE

Comme nous l'avons dit, au début de ce chapitre, les seuls alliages de magnésium qui soient utilisés dans l'industrie sont ceux de magnésium et d'aluminium. Le prix élevé du magnésium empêche le développement de ces alliages.

L'étude industrielle la plus complète qui ait été faite sur ces alliages est due à M. Mietthe, qui l'a publiée dans les *Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbfleisses* (1900, p. 93).

Nous en donnons un résumé :

Le magnalium est un alliage de magnésium et d'aluminium ; ce type d'alliage n'est pas nouveau, mais ce n'est que récemment qu'on est parvenu à préparer les métaux constituants à l'état de pureté et à reconnaître les propriétés spéciales des alliages en question. C'est le fils du Dr Mach, de Berlin, qui a préparé à Vienne le premier alliage d'aluminium et de magnésium, il y a une dizaine d'années. Le produit qu'il obtint ne contenait qu'une très faible quantité de magnésium.

Lorsqu'on fond ensemble avec les précautions nécessaires de l'aluminium et du magnésium, on obtient un alliage dont les propriétés diffèrent considérablement suivant les proportions respectives des deux constituants ; les propriétés semblent parcourir une sorte de cycle lorsqu'on va de l'aluminium pur au magnésium pur.

Les propriétés chimiques et mécaniques de l'aluminium pur sont déjà connues. C'est un métal relativement mou. A mesure qu'on lui ajoute du magnésium — l'addition variant de 5 à 30 0/0 — on obtient un alliage de plus en plus dur. Les numéros à faible teneur en magnésium sont encore assez mous. Il possède alors les mêmes propriétés que les différents types de bronzes, et, à la teneur de 30 0/0 de magnésium, sa dureté

est intermédiaire entre celle du bronze et de l'acier. Si la teneur du magnésium croît encore, le métal devient extrêmement dur et cassant et, à la teneur de 50 0/0 de magnésium, il ne résiste plus au choc du marteau; mais, par contre, il peut prendre un poli magnifique. Si cet alliage est inutilisable en mécanique, il peut, par contre, trouver d'intéressantes applications dans la miroiterie et la construction des instruments d'optique.

Si la teneur en magnésium continue à croître au delà de 50 0/0, la dureté commence à diminuer, et l'on se rapproche de plus en plus des propriétés du magnésium pur.

Les alliages qui présentent le plus d'intérêt sont les alliages à forte teneur en aluminium. Celui qui paraît susceptible du plus grand nombre d'applications, en raison de ses propriétés mécaniques, renferme de 25 à 30 0/0 de magnésium [1].

Il n'y a que peu de chose à dire des propriétés chimiques de cet alliage. Le magnésium est un élément peu stable au point de vue chimique. A ce même point de vue, l'aluminium n'a pas répondu pleinement aux espérances que l'on avait fondées sur lui.

L'alliage des deux métaux est un peu supérieur à ce point de vue à chacun des constituants. Il est absolument inaltérable à l'air atmosphérique et conserve son poli presque indéfiniment. Il peut être maintenu longtemps au contact de l'eau pure sans montrer aucun signe d'altération. Alors que l'aluminium et le magnésium sont isolément attaqués par l'oxygène, par des éléments analogues à l'oxygène et par les alcalis, l'alliage résiste beaucoup mieux à ces divers agents.

Le magnalium peut être moulé aisément et permet d'obtenir des pièces de forme extrêmement compliquée, bien que parfaitement homogènes. On fabrique couramment, au moyen de ce métal qui renferme de 7,5 à 10 0/0 de magnésium, des pièces d'horlogerie, supports, enveloppes pour instruments

1. D'après les travaux de M. Boudouard ces proportions paraissent un peu élevées.

d optique, objectifs photographiques, etc. La résistance au choc de cet alliage est très élevée. Sa résistance à la traction varie de 18,5 à 23^{kg},4 par millimètre carré.

La préparation des alliages magnalium est extrêmement simple.

On fond séparément les deux métaux et l'on verse l'aluminium liquide sur le magnésium à la température de 650°.

Le prix du magnésium est actuellement de 22 francs le kilogramme, en sorte que le prix de revient du magnalium est encore assez élevé. Mais il est évident que ce prix diminuerait considérablement, le jour où l'on entreprendrait en grand la fabrication du nouvel alliage.

CONCLUSIONS

Le magnésium a un prix très élevé qui le rend prohibitif pour la plupart des emplois industriels.

Le seul alliage industriel de magnésium est le magnalium, renfermant 90 à 92,5 0/0 d'aluminium.

Il est formé, d'après les recherches de M. Boudouard, d'aluminium entouré d'eutectique Al-AlMg.

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE XXIII

CUIVRE-MAGNÉSIUM

Boudouard, *Bulletin de la Société d'Encouragement*, août 1903 (*Étude théorique*).
Parkinson, *Chemical Society*, 2e série, t. V, p. 117 (*Étude chimique*).

ALUMINIUM-MAGNÉSIUM

Boudouard, *Bulletin de la Société d'Encouragement*, novembre 1901 (*Étude théorique*).
Mietthe, *Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbfleisses*, 1900, p. 93.
Parkinson, *Chemical Society*, (2), t. V, p. 117 (*Étude chimique*).
Wöhler, *Annalen Chem. Pharm.*, t. CXXXVIII p. 235 (*Id.*).

MAGNÉSIUM-CADMIUM, MAGNÉSIUM-ZINC

Boudouard, *Bulletin de la Société d'Encouragement*, août 1902 (*Étude théorique*) ; — *Revue de Métallurgie*, octobre 1904 (*Id.*).

MAGNÉSIUM-PLOMB, MAGNÉSIUM-ÉTAIN

Kournakoff et Stéphanoff, *Bulletin de la Société russe de Physique et de Chimie*.
Heycock et Neville, *Journal Chemical Society*, LXI, 888, 1892.

CHAPITRE XXIV

ALLIAGES DE MERCURE : AMALGAMES

On donne le nom d'*amalgames* aux alliages renfermant du mercure.

Les principaux amalgames sont, en laissant de côté ceux des métaux alcalins et alcalino-terreux, dont nous ne dirons qu'un mot plus loin : les amalgames de zinc, de cadmium, d'étain, de cuivre, de plomb, de bismuth, d'argent et d'or.

Étude théorique. — L'étude théorique des amalgames, sans être très complète, a cependant éclairé la constitution d'un certain nombre d'entre eux.

Nous citerons les déterminations les plus importantes :

MM. Fay et North ont déterminé la courbe de fusibilité de l'amalgame de plomb et ont établi que cette courbe présente un maximum correspondant à la combinaison Pb^2Hg (*American Journal*, XXV, 216, 231). De même, Kournakoff et Pouchine ont établi, par la même méthode, que le mercure et le thallium forment une combinaison qui correspond à la formule Hg^2Th (*Bulletin de la Société d'Encouragement*, 28 février 1902).

D'autre part, quelques déterminations de chaleur de formation ont été faites. Elles ne présentent pas toujours un grand intérêt. Il faut, toutefois, retenir les expériences de M. Berthelot démontrant la grande quantité de chaleur (18 à 57 calories)

qui est mise en jeu dans la formation des divers amalgames de potassium et de sodium et les déterminations du même savant sur les amalgames d'argent, qui le conduisent aux résultats suivants :

$$Hg + Ag = HgAg + 2^{cal},36$$
$$Hg^2 + Ag = Hg^2Ag + 1^{cal},53$$
$$\frac{7}{6} Hg + Ag = \frac{1}{6} (Hg^7Ag^6) + 2^{cal},17$$

Enfin, il est bon de rappeler que l'étude chimique des alliages fut en quelque sorte appliquée dès le début aux amalgames dont on a pu extraire des combinaisons définies, très nettement cristallisées.

Étude industrielle. — AMALGAMES DE ZINC. — *Fabrication.* — Les amalgames de zinc se préparent en jetant du zinc dans du mercure chauffé.

Lorsque l'alliage renferme trois fois plus de mercure que de zinc, on obtient un résidu très bien cristallisé qui a pour formule :

$$HgZn^3$$

Propriétés. — La seule propriété des amalgames de zinc qui soit à retenir est la résistance qu'ils opposent aux réactifs chimiques, notamment aux acides dilués.

Utilisations. — Les amalgames de zinc n'ont pas reçu, en eux-mêmes, d'applications industrielles. Mais le zinc amalgamé, c'est-à-dire le zinc que l'on a recouvert d'une couche d'amalgame, est trop utilisé pour que nous n'en parlions pas. On sait, en effet, qu'il forme la cathode, tantôt sous forme de bâton, de bande, de spirales, tantôt sous forme de récipients mêmes (piles sèches d'automobiles) des piles Bunsen, Daniell, Leclanché, etc...

Le zinc ordinaire serait attaqué par l'électrolyte en circuit ouvert; il n'en est plus de même avec le zinc amalgamé, qui

résiste parfaitement à cette action. Le mercure empêche en quelque sorte le zinc de former des couples voltaïques (extrêmement faibles, il est vrai) avec tous les corps étrangers qu'il renferme à l'état d'impuretés.

Pour produire la couche superficielle d'amalgame de zinc, on peut plonger la lame ou le bâton de zinc préalablement décapé dans une solution de nitrate mercurique, ou le frotter, toujours après décapage, avec une brosse de fil de fer ou de cuivre imprégnée de mercure.

Amalgames de cadmium. — *Fabrication.* — On prépare les amalgames de cadmium en faisant réagir le cadmium sur le mercure à froid ; la formation de ces alliages se fait avec dégagement de chaleur.

Stromeyer a montré qu'en saturant le mercure de cadmium on obtient la combinaison Hg^2Cd, qui est cristallisée en octaèdres et fond à 75°.

Utilisations. — On utilise deux sortes d'alliages de mercure et de cadmium. Ce sont, d'une part, l'amalgame à parties égales de l'un et de l'autre des métaux et, d'autre part, l'alliage à 2 parties de mercure et 1 partie de cadmium.

Ils sont employés comme mastics pour le plombage des dents.

Amalgames d'étain. — *Fabrication.* — Les amalgames d'étain sont obtenus par action directe du mercure sur l'étain à chaud.

Utilisations. — Ces alliages ont été utilisés pendant fort longtemps pour l'étamage des glaces ; mais on a substitué à cette opération, très dangereuse au point de vue hygiénique, l'argenture. Sur une feuille d'étain placée sur une plaque de métal bien dressée (*marbre*), on versait du mercure. Au bout de quelques instants, on glissait la glace à étamer sur la feuille d'étain ainsi préparée en chassant le mercure et en ne laissant aucune bulle d'air intercalée.

Après plusieurs jours, la glace se trouvait recouverte d'une faible couche d'amalgame formée de 4 parties d'étain et de 1 partie de mercure.

Amalgames de cuivre. — *Fabrication.* — Les préparations

des amalgames de cuivre sont assez difficiles, le mercure ne s'unissant pas aisément au cuivre.

On utilise ordinairement le cuivre précipité d'une solution de sel cuivrique par le fer; on en fait une bouillie soit avec l'acide sulfurique, soit avec une solution de nitrate mercureux et on mélange cette bouillie au mercure.

Utilisations. — Les amalgames de cuivre ont divers emplois intéressants :

L'alliage renfermant :

Hg.................	70 0/0
Cu..................	30 0/0

est connu dans l'industrie sous le nom de *mastic métallique;* il est utilisé dans la réparation des objets en porcelaine.

Les alliages de composition :

Hg............	70 à 55 0/0
Cu............	30 à 45 0/0

jouissent d'une propriété fort remarquable : ils se ramollissent et se pétrissent très aisément quand on les broie après chauffage; au bout de quelques heures, ils sont susceptibles de redevenir très durs; ils permettent donc de prendre des moulages délicats.

D'ailleurs, Debray affirme qu'en chauffant une médaille obtenue par le procédé que nous venons d'indiquer (avec l'amalgame à 45 0/0 de cuivre) dans un courant d'hydrogène sec on garde la médaille intacte; le cuivre est resté, tandis que le mercure s'est volatilisé.

Pour éviter les pertes d'or, dans le traitement des minerais aurifères par certains appareils, tels que bocards et moulins, on munit ceux-ci de plaques de cuivre amalgamées qui retiennent l'or.

Enfin l'amalgame à 30 0/0 de cuivre a été utilisé en chirurgie dentaire pour le plombage des dents. Il a été abandonné à cause de sa grande altérabilité.

Amalgames de plomb. — *Fabrication.* — Les amalgames de plomb se préparent directement à chaud ; s'ils renferment beaucoup de plomb, ils sont solides ; si le mercure domine, ils sont liquides.

On admet généralement trois combinaisons de plomb et de mercure :

$$HgPb^2,\ Hg^3Pb^4 \text{ et } HgPb^{16}$$

L'existence de $HgPb^2$ est prouvée par la courbe de fusibilité.

De plus, Joule a montré qu'on obtient ce composé en comprimant fortement les amalgames de plomb riches en mercure.

Si l'on mélange 2 parties de plomb et 1 partie de mercure, on obtient un alliage qui, attaqué par l'acide acétique, laisse un résidu très nettement cristallin et de formule :

$$Hg^3Pb^4$$

Enfin, si l'on chauffe les amalgames de plomb dans la vapeur de mercure jusqu'à l'obtention d'un poids constant, on obtient la combinaison :

$$HgPb^{16}$$

Leur propriété la plus nette est la suivante : chauffés vers 450°, ils perdent tout le mercure qu'ils contiennent.

Utilisations. — La seule utilisation des amalgames de plomb réside dans leur emploi pour la soudure autogène du plomb. On place entre les deux parties à souder de l'amalgame de plomb, et l'on chauffe avec un fer à souder. Le mercure est chassé ; le plomb reste.

Il est inutile de faire remarquer le grand danger que présente une telle opération, de par la nocivité des vapeurs mercurielles qui se produisent ; aussi est-elle fort peu usitée.

Amalgames de bismuth. — *Fabrication.* — On prépare les amalgames de bismuth en mélangeant le bismuth pulvérisé au mercure ou, mieux, en mélangeant le mercure chaud au bismuth fondu.

Quand un amalgame renferme moins de 20 0/0 de bismuth, il est liquide à la température ordinaire.

Utilisations. — Les principales applications des alliages de mercure et de bismuth résident dans l'étamage du verre. On emploie alors l'alliage :

Hg.................	80 0/0
Bi.................	20 0/0

Il suffit de chauffer cet alliage et de le promener sur la surface du verre à étamer; il y adhère fortement.

Comme le bismuth est d'un prix élevé, on substitue souvent à l'amalgame précipité le suivant :

Hg.................	40 0/0
Bi.................	20 0/0
Pb.................	20 0/0
Sn.................	20 0/0

M. Ditte a préconisé pour le même usage un autre alliage :

Hg.....................	10
Bi.....................	2
Pb.....................	1
Sn.....................	1

Amalgames d'argent. — *Fabrication*. — Ces amalgames peuvent se former à froid ou à chaud. Quand on fait dissoudre à saturation de l'argent dans le mercure et qu'on laisse refroidir, on obtient de très belles cristallisations, connues sous le nom d'*arbre de Diane*. Ces fines aiguilles correspondent à la formule :

$$Hg^3Ag.$$

Sous forte pression et à la température ordinaire, cette combinaison se dédouble en mercure et en un composé très bien cristallisé de formule :

$$HgAg$$

Il s'obtient d'ailleurs à chaque fois que l'on filtre par pression dans une peau de chamois un amalgame quelconque d'argent.

On sait que l'arbre de Diane Hg^3Ag s'obtient par réaction du mercure sur une dissolution d'un sel d'argent.

Il suffit de mettre un peu de mercure au fond d'un récipient contenant une solution étendue de nitrate d'argent : le mercure précipite l'argent, celui-ci s'allie au mercure et donne des arborescences superbes.

Il est bon également de rappeler que, parmi les minerais d'argent, il existe des amalgames, tels que l'*Arquérite*, le mercure argental.

Utilisation. — La seule application réelle des amalgames d'argent se trouve dans l'argenture. Une fois la glace argentée, on fait agir une solution de cyanure double de potassium et de mercure. Il se forme alors un amalgame d'argent qui, très brillant par lui-même, adhère fortement au verre. Toutefois, la formation de l'amalgame par ce procédé, dû à M. Petitjean, est fort irrégulière.

D'après M. Léon de Mortillet, ingénieur des Arts et Manufactures[1], M. Lenoir y a apporté le perfectionnement suivant :

« On saupoudre la glace, au moment où elle est recouverte de la solution mercurielle, de zinc en poudre très fine qui précipite le mercure et régularise l'amalgamation. »

D'autre part, il est bon de rappeler que le traitement des minerais d'argent, de teneur peu élevée en ce métal, est basé sur l'emploi du mercure et la formation de l'amalgame, soit pour réduire le chlorure d'argent (procédé américain), soit pour concentrer l'argent (méthode de Freiberg)

Amalgames d'or. — *Fabrication.* — Ces alliages se préparent par l'action du mercure sur l'or très divisé à la température d'environ 350°.

Ceux de ces alliages qui renferment moins de 10 0/0 d'or sont liquides.

1. *Les Amalgames et leurs applications*, par Léon de Mortillet (Librairie Bernard-Tignol).

Ceux qui en contiennent plus de 15 0/0 sont solides. Entre 10 et 15 0/0 d'or, ces alliages sont pâteux.

Lorsqu'on laisse refroidir une solution d'or dans le mercure faite à une température voisine du point d'ébullition de ce métal, il se sépare des lamelles qui ont pour formule :

$$Hg^4Au.$$

Sous une forte pression, ce composé se dédouble d'ailleurs, à la température ordinaire, en mercure et en un nouvel amalgame de formule :

$$HgAu^2$$

Utilisations. — La métallurgie de l'or (traitement des sables aurifères, traitement des minerais aux broyeurs, bocards, amalgamateurs, etc...) utilise les amalgames d'or qui ont trouvé une application importante dans la dorure au mercure, procédé qui est presque abandonné à l'heure actuelle. Il était utilisé pour dorer l'argent, le cuivre et ses alliages. Il consistait essentiellement à faire agir sur la surface bien décapée du métal un amalgame ayant la composition suivante :

Hg.............	1 partie
Au.............	2 parties

On chauffait ensuite à une température suffisamment élevée pour chasser tout le mercure. Il ne faut pas oublier, en effet, que tous les amalgames d'or et d'argent se décomposent en or ou argent et mercure sous l'action de la chaleur.

Amalgames complexes. — L'industrie utilise quelques amalgames plus complexes que ceux que nous venons d'étudier.

Nous avons déjà cité des alliages quaternaires utilisés pour l'étamage du verre, qui sont d'un prix moins élevé que l'amalgame de bismuth.

Un autre alliage, qui s'en rapproche, a la composition suivante :

Hg....................	9
Bi.....................	45
Pb....................	28
Sn.....................	18

Il fond à 77°,5 et reste pâteux jusqu'à 60°.

Il est employé pour l'injection des pièces anatomiques.

Il en est de même du suivant, qui fond à 40° :

Hg....................	10
Alliage de Darcet........	90

On sait que l'alliage de Darcet, qui fond à 93°, est formé de :

Bi....................	50
Pb....................	25
Sn....................	25

Pour garnir les coussinets des machines électriques à frottement, on utilise l'amalgame suivant :

Hg....................	50
Sn....................	25
Zn....................	25

Parfois on ajoute de petites quantités de plomb, au maximum 0,25 0/0, au mercure employé dans la construction des baromètres et thermomètres; on a moins à craindre la formation de globules sur le verre.

Il nous faut encore citer l'emploi d'amalgames comme alliages très fusibles, notamment ceux contenant du cadmium.

En terminant, nous devons citer l'application qu'a su faire l'industrie électrochimique des amalgames de métaux alcalins pour la fabrication de la soude et de la potasse (procédés dits au mercure).

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE XXIV

Berthelot, *Annales*, XVIII, 433, 1879; — *Comptes Rendus*, CXXXII, 241, 1901.

Foy et North, *American Journal*, XXV, p. 216 (*Fusibilité*).

Kournakoff et Pouchine, *Bulletin de la Société d'Encouragement*, février 1902 (*Fusibilité*).

L. de Mortillet, *les Amalgames et leurs applications*, Bernard Tignol (*Étude générale*).

CHAPITRE XXV

ALLIAGES D'ARGENT

Les principaux alliages d'argent sont :
Les alliages argent-cuivre, très employés, comme l'on sait :
Les alliages argent-or qui seront étudiés au chapitre suivant;
Les alliages argent-étain;
Les alliages argent-zinc;
Les alliages argent-cadmium;
Les alliages argent-plomb;
Les alliages argent-bismuth;
Les alliages argent-antimoine.
(Ces derniers ne présentent qu'un intérêt purement théorique.)
Et quelques alliages complexes, notamment :
Argent-cuivre-zinc;
Argent-cuivre-nickel;
Et argent-nickel-cuivre-zinc.

ALLIAGES D'ARGENT ET DE CUIVRE

Étude théorique. — L'étude théorique des alliages argent-cuivre a été faite par un certain nombre de savants, à la tête desquels il faut placer le regretté Roberts-Austen.

Courbe de fusibilité. — Cette courbe a été déterminée par ce savant en 1878 et publiée dans les *Proceedings of the Royal Society* de Londres, la même année, puis contrôlée par lui, en 1891, au moyen d'un couple Le Chatelier et déterminée à nouveau par Heycock et Neville en 1897 (*Philosophical Transactions*, 1897).

La courbe (*fig.* 206) est composée de deux branches qui

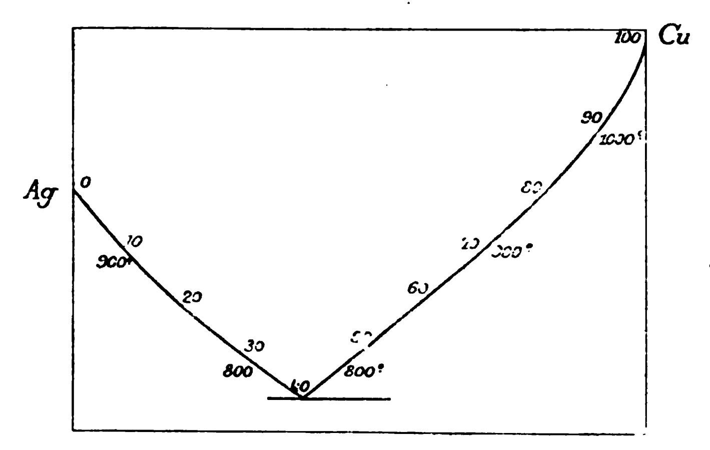


Fig. 206. — Courbe de fusibilité des alliages cuivre-argent (Heycock et Neville).

viennent se rejoindre en un point eutectique qui correspond à 40 0/0 de cuivre et fond un peu au-dessous de 800°.

Cet eutectique avait été considéré pendant longtemps comme une combinaison Ag^3Cu^2 (Levol).

Métallographie. — L'étude micrographique des alliages argent-cuivre a été faite par M. Osmond et publiée dans les *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, en 1897. Elle confirme entièrement les données de la courbe de fusibilité.

Résistance électrique. — Matthiessen a déterminé la courbe de conductibilité des alliages argent-cuivre. Il a trouvé un maximum correspondant à la combinaison $AgCu^3$ mise en doute aujourd'hui.

Force électromotrice. — Les déterminations faites par M. Herschkowitsch, n'ont mis en vue aucune combinaison.

Étude industrielle. — De tous les alliages d'argent ceux de cuivre sont assurément les plus importants au point de vue pratique.

Fabrication. — La préparation des alliages argent-cuivre ne présente pas de particularité; on recouvre la surface du bain de poussier de charbon.

Quand le métal est destiné au laminage, on coule toujours dans les lingotières plates.

Lorsqu'on utilise des déchets tels que la tournure, on doit la refondre en présence de matières qui pourront enlever une grande partie des impuretés. On emploiera, par exemple, un mélange de sel, de carbonate de soude, de bisulfate de potasse, de nitrates alcalins.

Propriétés. — Le cuivre donne à l'argent de la ténacité et surtout de la dureté.

Le *maximum* de dureté est donné par l'alliage renfermant environ :

Cu....................	67
Ag....................	33

Tant que la teneur en cuivre est inférieure à 50 0/0, la couleur de l'alliage est blanche. De 50 à 70 0/0 de cuivre, la couleur est légèrement jaune ; elle redevient rouge à 70 0/0 de cuivre.

Ces alliages présentent toujours un peu de liquation. Ils se prêtent fort bien au travail, laminage, martelage, étirage, etc.

Utilisations. — Les alliages d'argent et de cuivre sont utilisés :

A. Pour les monnaies ;

B. Pour les vaisselles;

C. Pour la bijouterie ;

D. Pour les soudures.

A. *Alliages pour monnaies.* — En France, on *admettait* autrefois comme monnaies les alliages suivants :

1° *Monnaie d'argent :*

Ag....................	900
Cu....................	100

erreur tolérée :

Cuivre...... de 97 à 103 0/0

Le poids spécifique de l'alliage doit être compris entre 10,23 et 10,3.

2° *Monnaie de billon :*

Cu............... 800 pour 1.000

erreur tolérée :

Cuivre...... de 797 à 807 pour 1.000

On sait que la monnaie de billon en argent n'existe plus depuis 1810.

MONNAIES D'ARGENT

PAYS	DÉNOMINATION DES PIÈCES	VALEUR AU PAIR EN FRANCS	TITRE LÉGAL	POIDS LÉGAL EN GRAMMES
	5 francs	4,9625	900	25,000
	2 —	1,8416		10,000
France	1 —	0,9208	835	5,000
	0,50	0,4604		2,500
	0,20	0,1842		1,000
	5 marks	5,56		27,777
Allemagne	2 —	2,22	900	11,111
	Mark	1,11		5,555
	1/2 mark	0,56		2,777
	Couronne	5,81		28,276
	1/2 couronne	2,91		14,138
	2 florins	4,64		22,620
	Florin	2,32		11,310
	Shilling	1,16		5,655
Angleterre	6 pence	0,58	925	2,828
	4 pence	0,39		1,885
	3 pence	0,29		1,414
	2 pence	0,19		0,942
	1 penny	0,10		0,471
	5 couronnes	4,80	900	24,000
Autriche-Hongrie	Couronne	0,93	835	5,000
	Thaler	5,20	833 1/2	28,075
	5 francs	5,00	600	25,000
	2 —	1,86		10,000
Belgique	Franc	0,93	835	5,000
	50 centimes	0,46		2,500

Danemark	2 kronen	2,67	800	15,000
	Krone	1,33		7,500
	25 ore	0,32	600	2,420
	10 ore	0,13	400	1,450)
Espagne	5 pesetas	5,00	900	25,000
	2 pesetas	1,86	835	10,000
	Peseta	0,93		5,000
	1/2 peseta	0,46		2,500
Grèce	5 drachmes	5,00	900	25,000
	2 drachmes	1,86	835	10,000
	Drachme	0,93		5,000
	50 lepta	0,46		2,500
	20 lepta	0,19		1,000
Italie	5 lire	5,00	900	25,000
	2 lire	1,86	835	10,000
	1 lira	0,93		5,000
	50 centesimi	0,46		2,500
	20 centesimi	0,19		1,800
Norwège	2 kroner	2,67	800	15,000
	1 krone	1,33		7,500
	50 ore	0,67	600	5,000
	40 ore	0,53		4,000
	25 ore	0,32	400	2,420
	10 ore	0,13		1,450
Pays-Bas	Rixdaler	5,25	945	25,000
	Florin	2,10		10,000
	1/2 florin	1,05		5,000
	25 cents	0,51	640	3,575
	10 cents	0,20		1,400
	5 cents	0,10		0,685

PAYS	DÉNOMINATION DES PIÈCES	VALEUR AU PAIR EN FRANCS	TITRE LÉGAL	POIDS LÉGAL EN GRAMMES
	Milreis	5,10		25,000
	5 testons	2,55		12,500
Portugal................	2 testons	1,02	916,66	5,000
	Teston	0,51		2,500
	1/2 teston	0,25		1,250
	Rouble (avant 1886)	3,99	868	20,735
	Rouble (depuis 1886)	4,00		20,000
	50 kopecks	2,00	900	10,000
	25 —	1,00		5,000
Russie..................	20 —	0,40		3,600
	15 —	0,30		2,700
	10 —	0,20	500	1,800
	5 —	0,10		0,900
	2 kronor	2,67	800	15,000
	Krona	1,33		7,500
Suède	50 ore	0,67	600	5,000
	25 ore	0,32	400	2,420
	10 ore	0,13		1,450
	5 francs	5,00	900	25,000
Suisse..................	2 —	1,86		10,000
	1 —	0,93	835	5,000
	0,50	0,46		2,500
	Dollar	5,00		26,729
	1/2 dollar	2,00		12,500
États-Unis...............	1/4 dollar	1,25	900	6,250
	20 centimes	1,00		5,000
	Dime	0,50		2,500

Le tableau des pages 998 à 1000 donne les valeurs, titres et poids des monnaies d'argent utilisés dans les différents États

B. *Alliages pour vaisselles.* — En France, l'alliage légal pour les vaisselles est au titre :

Ag.. 950 pour 1.000 avec une tolérance de 5 millièmes en moins.

On le désigne parfois sous le nom d'alliage premier titre.

En Allemagne, on admet trois titres :

Ag............. 950, 800 ou 750 pour 1.000

En Angleterre, le seul titre admis est le même que pour les monnaies, c'est-à-dire :

Ag.......... 925 pour 1.000

Il est bien entendu que les alliages que nous venons de donner sont ceux reconnus légalement et poinçonnés officiellement.

C. *Alliages divers pour objets manufacturés.* — Ces alliages, légaux ou non, ont à peu près les teneurs que nous venons d'indiquer pour les vaisselles.

En France, on a créé un titre légal spécial, dit second titre. Il correspond à l'alliage :

Ag.....................	800
Cu.....................	200

Il est fabriqué avec une tolérance de 5 millièmes.

D. *Alliages pour la soudure de l'argent.* — Ils renferment généralement du zinc.

Nous en parlons à la fin de ce chapitre. En Angletere, cependant, on utilise l'alliage :

Ag.....................	80
Cu.....................	20

pour la soudure de vaisselles.

Seuls peuvent être utilisés en France les titres indiqués, c'est-à-dire 950 et 800 millièmes (ce dernier pour la bijouterie).

Cependant la loi du 25 janvier 1884 autorise les orfèvres, bijoutiers, joailliers à fabriquer d'autres alliages à tous titres, mais pour l'*exportation seule*. Les objets préparés avec des alliages à bas titre sont généralement décapés pour enlever le cuivre superficiellement; ils reçoivent un poinçon spécial, indiquant le titre de l'alliage.

On adopte généralement des titres contenant au moins 60 0/0 d'argent. Là est la limite des alliages ayant la couleur blanche requise.

En résumé. — Les alliages cuivre-argent employés le plus généralement dans l'industrie sont ceux renfermant plus de 75 0/0 d'argent. Ils sont formés d'argent entouré d'eutectique cuivre-argent.

ALLIAGES D'ARGENT ET D'ÉTAIN

Étude théorique. — COURBE DE FUSIBILITÉ. — Cette courbe, déterminée par M. Henri Gautier, se compose de deux branches dont la rencontre indique un eutectique fondant à 221° et correspondant à une teneur d'environ 5 0/0 d'argent. La seconde branche a une allure ondulée qui fait croire à l'existence d'une combinaison de deux métaux isomorphes avec l'argent; elle présente deux points d'inflexion qui correspondent aux alliages renfermant 40 et 70 0/0 d'argent (*fig.* 207).

MÉTALLOGRAPHIE. — M. Behrens a étudié ces alliages par micrographie; d'après ce savant, les alliages Ag^6Sn, Ag^4Sn, Ag^3Sn et Ag^2Sn sont homogènes, et il conclut à une série de combinaisons d'argent et d'étain. Rien ne prouve que ce ne soit pas des solutions solides.

M. Charpy a repris l'étude de ces composés (*Contribution à l'étude des alliages*, Société d'Encouragement, p. 153). Il a

fait d'abord remarquer très justement que le fait de donner par fusion des cristaux bien nets, fait sur lequel s'appuyait M. Behrens, ne paraît pas suffisant pour caractériser un composé défini.

L'alliage contenant 10 0/0 d'argent montre, par simple polissage, des cristaux durs englobés dans l'alliage eutectique.

Une attaque à l'acide chlorhydrique très étendu accentue nettement cette structure et permet de distinguer dans l'alliage eutectique des traînées cristallines très fines, non attaquées et qui paraissent identiques aux cristaux isolés.

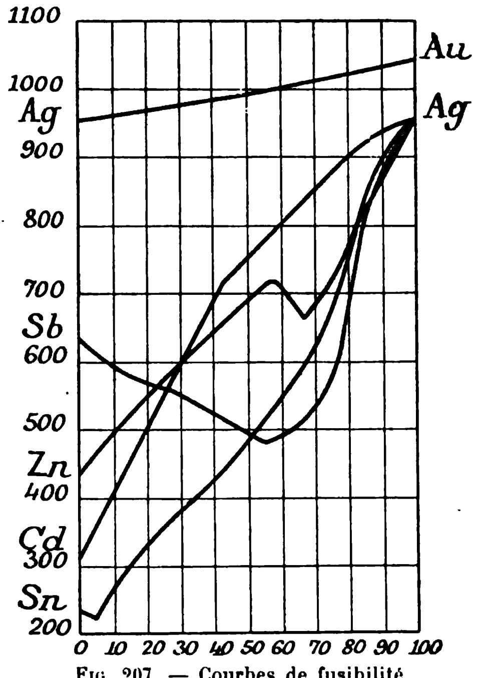


FIG. 207. — Courbes de fusibilité des alliages d'argent.

Quand on augmente la proportion d'argent, on voit le nombre de ces cristaux augmenter ; dans l'alliage à 30 0/0 environ, ils sont agglomérés en dendrites ; dans l'alliage à 50 0/0 d'argent, le corps dur se présente sous forme de cristallites à bords arrondis se touchant presque. Les cristaux paraissent blancs; l'alliage eutectique attaqué par l'acide chlorhydrique paraît noir.

Dans l'alliage à 60 0/0 l'alliage eutectique disparaît presque complètement.

Les alliages contenant plus d'argent sont sensiblement homogènes; quand la teneur en argent dépasse 75 0/0, on peut mettre en évidence une structure dendritique tout à fait comparable à celle des laitons riches en cuivre. L'oxydation

par électrolyse dessine les dendrites sans montrer de substance intermédiaire.

Ces résultats conduisent à admettre l'existence d'un composé défini contenant environ 70 0/0 d'argent et isomorphe avec l'argent ; les alliages contenant une plus forte proportion d'argent seraient alors des mélanges isomorphes.

Ce résultat n'est pas en contradiction avec les phénomènes de cristallisation signalés par M. Behrens ; en effet, les mélanges correspondant aux formules Ag^6Sn, Ag^4Sn, Ag^3Sn contiennent plus de 70 0/0 d'argent et seraient, par suite, des mélanges isomorphes ; Ag^2Sn contient environ 65 0/0 d'argent ; ce serait le composé défini, isomorphe avec l'argent.

FORCE ÉLECTROMOTRICE. — M. Herschkowitsch, en déterminant la force électromotrice de ces alliages, a pu mettre en évidence la combinaison $SnAg^4$, pour laquelle il se produit une brusque variation dans la force électromotrice.

Étude industrielle. — Les alliages d'argent et d'étain sont très fragiles et très durs, même lorsqu'ils ne renferment que très peu d'argent.

Ils n'offrent que peu d'intérêt industriel. Hiorns a cependant signalé l'utilisation d'un alliage d'argent et d'étain renfermant parfois de l'arsenic comme soudures pour des travaux divers.

ALLIAGES D'ARGENT ET DE ZINC

Étude théorique. — COURBE DE FUSIBILITÉ. — Cette courbe, déterminée par M. Henri Gautier, comprend deux branches dont l'une présente un maximum (*fig.* 207).

Elle met donc en évidence une combinaison correspondant à environ 58 0/0 d'argent fondant à 715° et un eutectique renfermant à peu près 67 0/0 d'argent et fondant à 675°.

M. Gautier pense que la combinaison doit être isomorphe de l'un des métaux constituants.

Métallographie. — M. Charpy a étudié cet alliage et a établi sa constitution par voie micrographique.

Les alliages riches en argent sont formés de cristallites englobées dans l'alliage eutectique ; ces cristallites, qui sont d'abord isolées dans l'alliage à 75 0/0 d'argent, s'agglomèrent en dendrites comparables à celles du bronze d'étain, dans l'alliage à 80 0/0. Un des meilleurs moyens pour les mettre en évidence consiste à soumettre l'alliage à l'action de l'hydrogène sulfuré, qui colore les cristallites en noir. Les alliages très riches en zinc sont formés de fines dendrites en feuilles de fougère englobées dans un alliage facilement attaquable par la potasse, mais qu'il n'a pas été possible de dédoubler.

Force électromotrice. — M. Herschkowitsch a mis en évidence, par cette méthode, la combinaison :

$$Zn^4Ag$$

Étude industrielle. — Les alliages argent-zinc sont de couleur blanc bleuté; ils possèdent une cassure très fine. Ils ont été proposés pour la fabrication de la monnaie, notamment l'alliage de formule :

Ag....................	835
Cu....................	93
Zn....................	27

Krupp assure que cet alliage peut se laminer facilement en feuilles. Des recuits peuvent lui rendre la malléabilité qu'il aura perdue. De telles monnaies sont plus dures et conservent plus longtemps leur couleur blanche que celles faites en alliages argent-cuivre.

D'après Percy, Godefrey a préparé les alliages suivants en versant le zinc fondu dans l'argent fondu [1].

1. Pauf, *Gold und Silver*, vol. I, p. 169.

	I	II	III	VI
Argent................	8,16	22,47	49,72	67,58
Zinc..................	91,84	77,53	50,28	32,42

I. La surface était gris bleuâtre. Le métal était dur, facilement cassant; le couteau l'entaillait aisément. La cassure était gris bleuâtre, granulée, d'un faible brillant.

II. La surface était gris bleuâtre. Plus dur que le numéro 1, le métal était assez fragile; le couteau l'entaillait plus difficilement. La fracture était gris bleuâtre brillante.

III. La surface était rouge cuivre après solidification. Le métal était dur, cassant et facilement pulvérisable. La surface rompue à froid était blanche, très brillante.

IV. La surface a une teinte fine jaune rougeâtre. Le métal était dur et facilement cassant; sa cassure blanche et très brillante se ternissait bientôt.

Un alliage de 2 parties en poids de zinc et 1 d'argent passe pour être ductile, avoir une cassure finement granulée et être presque aussi blanc que l'argent[1].

ALLIAGES D'ARGENT ET DE CADMIUM

Ces alliages, qui ne présentent aucun intérêt industriel, ont été étudiés, quant à la fusibilité, par M. H. Gautier, qui a montré que la courbe des points de fusion est formée de deux arcs qui paraissent indiquer l'existence de mélanges isomorphes ou de solutions solides (*fig.* 207).

Il est à retenir que l'alliage renfermant 50 0/0 de chacun des métaux constituants possède une jolie couleur violet rosé, rappelant un peu celle des alliages antimoine-cuivre.

1. *Handwœrterbuch der Chimie*, VII, p. 958.

Bramt a signalé que le cadmium donne aux alliages d'argent de la ductilité.

ALLIAGES D'ARGENT ET DE PLOMB

Étude théorique. — Métallographie. — Behrens a étudié les alliages d'argent et de plomb par voie micrographique. — Voici le résumé des observations qu'il a faites.

Ces alliages montrent avec une faible teneur d'argent un point de fusion plus bas que le plomb, de sorte que le plomb à peu près pur peut cristalliser complètement pendant que la teneur en argent de la lessive-mère augmente. L'application de cette particularité à la méthode Pattinson de désargentation et la curieuse limitation de cette méthode aux alliages à moins de 20 0/0 Ag ont rendu particulièrement intéressante l'étude des alliages argent-plomb, malgré les difficultés que l'on rencontre dans le polissage et l'attaque.

Les alliages à 0,5 0/0 Ag montrent des cristaux de plomb grossiers, déchiquetés, au milieu desquels on trouve des petits points jaunâtres fortement brillants. Avec 1 0/0 Ag, les cristaux de plomb sont imparfaits, les points jaunâtres montrent de-ci, de-là, un contour carré.

Avec 1,5 0/0 Ag, les cristaux de plomb sont clairsemés et à peine reconnaissables en tant que cristaux, la plupart étant des blocs informes et déchiquetés ; les points jaunâtres brillants sont plus nombreux, et certains affectent la forme octaédrique.

Avec 25 0/0 Ag, la forme octaédrique de petits cristaux jaunâtres s'accuse beaucoup plus ; ils sont disséminés sur le polissage entier, même dans les cristaux de plomb très imparfaits et minces. On dirait que de petits octaèdres riches en argent ont été séparés presque en même temps que les cristaux dendritiques beaucoup plus gros, dans les alliages pauvres en

argent ; un peu plus tard, dans les alliages renfermant plus de 2 0/0 Ag. La ségrégation semble se faire en même temps dans les alliages dont la teneur en argent varie de 1,5 à 2 0/0 Ag La teneur conidérable en Ag des cristaux jaunâtres se constate le mieux au moyen d'attaque à l'acide chlorhydrique et à l'iodure de potassium avec addition prudente d'azotate de potassium ou de chlorate de potassium et traitement subséquent à l'eau bouillante. L'iodure de plomb est dissous, et il reste des mouchetures carrées jaunâtres d'iodure d'argent. On voit en même temps à la faible coloration en jaune du fond et au trouble de la solution décantée de plomb que la séparation de l'argent n'est pas de beaucoup aussi complète que dans le zinc argentifère; d'ailleurs les petits cristaux octaédriques brillants renferment beaucoup plus de plomb qu'on ne le supposerait d'après leur aspect argentin.

L'isolement par voie chimique n'a pas réussi. La solution de potasse agit trop lentement sur le plomb, l'acide sulfurique trop vite sur l'argent; l'acide acétique dissout en une semaine le plomb et dépose un argent renfermant du plomb spongieux et pulvérulent, dont on ne peut pas séparer suffisamment les cristaux.

Force électromotrice. — La détermination de la force électromotrice faite par Laurie a montré qu'elle varie d'une façon continue.

Étude industrielle. — On sait que le plomb s'allie facilement à l'argent, et que cette propriété a donné lieu à l'opération industrielle que l'on nomme *coupellation*.

Mais ces alliages ne sont en eux-mêmes d'aucun intérêt. Un alliage à parties égales d'argent et de plomb, dit Guettier, se rapproche beaucoup plus du plomb que de l'argent. Il est mou, passablement ductile et malléable.

ALLIAGES D'ARGENT ET DE BISMUTH

Ces alliages ont été très peu étudiés ; cependant Guettier signale qu'ils sont aigres, cassants et lamelleux, de couleur blanche analogue à celle du bismuth. Certains indiquent, toutefois, un peu de malléabilité. Ils sont sans intérêt, le bismuth, que certains chimistes ont trouvé préférable au plomb pour l'affinage de l'argent, étant d'un prix trop élevé en pareil cas pour être utilisé.

Laurie a étudié la force électromotrice et montré qu'elle était sensiblement constante, quelle que soit la composition.

ALLIAGES D'ARGENT ET D'ANTIMOINE

Étude théorique. — Courbe de fusibilité. — Cette courbe a été déterminée par M. Henri Gautier (*fig.* 207). Elle se compose de deux branches. Au point de jonction se trouve l'eutectique contenant environ 55 0/0 d'argent et fondant à 482°. Mais les branches de courbe sont un peu ondulées. Elles présentent chacune un point d'inflexion : l'un, à peine marqué, correspond à l'alliage contenant 20 0/0 d'argent ; l'autre, très net, pour l'alliage à 80 0/0 d'argent.

Métallographie. — M. Charpy a étudié la micrographie de ces alliages. Voici les résultats qu'il a obtenus :

Les alliages riches en antimoine sont très durs et prennent facilement un beau poli ; le polissage suffit pour y faire ressortir des cristaux durs d'antimoine englobés dans un alliage eutectique dont la proportion augmente avec celle de l'argent. Une attaque à l'acide azotique étendu colore le magma et permet d'obtenir de très belles préparations.

Quand on dépasse la proportion d'argent qui correspond à l'alliage eutectique, on retrouve un tout autre aspect. Les

alliages beaucoup moins durs se polissent encore bien; mais le polissage ne suffit pas à en révéler la structure. En attaquant par l'acide azotique étendu, on dissout les cristallites à bords arrondis, englobés dans un alliage eutectique nettement formé de lames alternées dont les unes, très dures, semblent être de l'antimoine. On peut aussi colorer l'argent en noir par l'acide sulfhydrique; enfin, l'ammoniaque concentrée développe à la surface de l'antimoine, une pellicule d'oxyde qui le colore en bleu sombre et ne modifie pas la couleur de l'argent.

Quand on augmente la teneur en argent, les cristallites se réunissent et forment de longues dendrites; mais en même temps apparaît le caractère spécial des mélanges isomorphes; il est impossible, quel que soit le mode d'attaque employé, d'obtenir une séparation bien nette de ces dendrites avec le magma enveloppant. Quand on noircit par l'acide sulfhydrique ou qu'on oxyde par l'acide azotique, on voit se développer, à partir de la ligne médiane des dendrites, des colorations qui s'étendent graduellement sans présenter jamais de contours bien nets.

Cela conduirait donc à admettre l'existence d'un composé défini isomorphe avec l'argent. Cette conception avait été indiquée à M. Charpy par des mesures planimétriques effectuées sur le microgramme de l'alliage à 66 0/0 d'argent, dans lequel la séparation entre les cristallites et l'alliage eutectique est très nette.

Plusieurs séries de mesures effectuées sur les divers échantillons de cet alliage ont donné des résultats à peu près concordants et indiquant en moyenne que les cristallites constituaient les deux tiers de l'alliage; il est donc impossible que ces cristallites soient de l'argent pur, puisqu'il y en a en tout 66 0/0 et que l'alliage eutectique se compose de 55 0/0 d'argent pour 45 0/0 d'antimoine; ces cristallites doivent donc contenir de l'antimoine; en cherchant la proportion nécessaire pour établir la concordance entre les mesures planimétriques et l'analyse chimique, on trouve environ 28 0/0. On est ainsi

amené à conclure que les cristallites sont formées de 28 0/0 d'antimoine et 72 0/0 d'argent, ce qui correspond à la formule $SbAg^3$.

C'est dans cette région que se produit le point d'inflexion et qu'apparaissent les dendrites; d'ailleurs, les mesures planimétriques ne donnent qu'une indication et permettraient aussi bien d'admettre pour les cristallites la formule $SbAg^4$.

Étude industrielle. — Tous ces alliages sont très fragiles; ils possèdent une cassure cristalline et une couleur d'un blanc d'autant plus gris qu'ils contiennent plus d'antimoine.

ALLIAGES D'ARGENT ET DE NICKEL

On ne connaît que fort peu ces alliages. — Berthier a signalé un alliage renfermant 13,5 0/0 de nickel qui se laminait bien et pouvait acquérir un beau poli.

On trouve dans le commerce sous le nom de *tiers argent* un alliage que l'on dit être composé de 1/3 d'argent et 2/3 nickel. En réalité, d'après Knab, cet alliage correspondrait à la composition suivante :

Ag	27,53
Cu	59
Zn	9,17
Ni	3,42

Cet alliage est très employé pour la vaisselle, les couverts, etc. Il a donné d'excellents résultats.

ALLIAGES D'ARGENT, DE CUIVRE ET D'ARSENIC

D'après Knab, ces alliages sont utilisés en Angleterre pour la vaisselle de table. Ceci paraît bizarre. La composition la

plus ordinaire correspond à :

Ag	49
Cu	49
As	2

Ils ont une plus grande ductilité et une plus belle couleur que les alliages argent-cuivre.

ALLIAGES COMPLEXES D'ARGENT

Parmi les alliages complexes d'argent, les plus employés sont ceux d'argent, de cuivre et de zinc ou d'argent, de cuivre et de nickel. Ils renferment parfois du zinc.

Nous avons déjà dit, dans le chapitre du Nickel, ce qu'était le métal Ruolz si répandu. On se souvient qu'il renferme environ :

Cu	35 à 50
Ni	25 à 30
Ag	20 à 30

Il a été breveté, en 1854, par de Ruolz et de Fontenay. Il ne contient pas de zinc.

D'autres alliages du même genre ont été brevetés par Abel, de Londres.

D'après Hiorns, ceux qui sont destinés à la fabrication des objets par laminage, estampage, etc., sont de l'un des types suivants :

Ag	33,3
Ni	8,6
Cu	41,8
Zn	16,3

Ag	34
Ni	8
Cu	42
Zn	16

Pour les pièces fondues, la composition recommandée est :

Ag	20
Ni	25 à 35
Cu	45 à 55

La joaillerie utilise l'alliage suivant :

Ag	40
Ni	4,6
Cu	44,6
Zn	10,8

Ces alliages sont du même type que ceux de Ruolz.

Les alliages argent-cuivre-zinc sont aussi utilisés comme soudures pour l'argent.

En Angleterre, on emploie les alliages suivants :

1°	Argent monnayé	75
	Laiton (Cu = 66,7, Zn = 33,3)	25
2°	Argent monnayé	66,7
	Laiton	33,3
3°	Ag	63,3
	Cu	3,4
	Laiton	33,3

On sait, d'ailleurs, que ces soudures sont employées non seulement pour le travail de l'argent, mais aussi pour le travail de certains autres métaux ou alliages, notamment le cuivre, le laiton, etc...

Péligot avait étudié, en 1864 (*Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*), certains de ces alliages. Il signalait notamment la beauté des alliages ayant pour composition :

1°	Ag	50
	Cu	25
	Zn	25
2°	Ag	80,7
	Cu	10
	Zn	9,3

3°	Ag	83
	Cu	10
	Zn	7

On utilise quelquefois des alliages d'argent, de cuivre et de cadmium. Ce dernier métal donne à l'argent de la malléabilité et augmente encore sa blancheur. On emploie les alliages suivants pour la confection de fils et d'objets plaqués :

1°	Ag	980
	Cu	15
	Cd	5
2°	Ag	950
	Cu	15
	Cd	35
3°	Ag	900
	Cu	18
	Cd	82
4°	Ag	800
	Cu	20
	Cd	180
5°	Ag	667
	Cu	50
	Cd	283
6°	Ag	500
	Cu	50
	Cd	450

CONCLUSIONS

En résumé, les alliages d'argent présentant un intérêt industriel sont :

1° Les alliages de cuivre renfermant :

A. 80 à 90 0/0 Ag pour la monnaie ;

B. 75 à 95 0/0 pour les vaisselles, les produits manufacturés, les soudures, etc.

Nous en avons vu la constitution ;

2° L'alliage d'argent et de nickel contenant 1/3 d'argent et 2/3 de nickel.

On n'a pas de renseignements sur sa constitution, pas plus que sur celles d'alliages plus complexes.

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE XXV

TRAITÉS GÉNÉRAUX

Annuaire du Bureau des Longitudes (*Monnaies*), 1905.

Guettier, *la Fonderie en France* (*Généralités*).

Hiorns, *les Alliages métalliques* (Traduction Boudouard), Steinheil, éditeur (*Généralités*).

Knab, *Traité des Alliages métalliques*, Steinheil, éditeur (*Généralités*).

Krupp, *Die Legierungen*, Vienne, 1894, p. 144 (*Id.*).

Ledebur, *les Alliages métalliques*, Fritch, 1894 (*Généralités*).

ARGENT-CUIVRE

Herschkowitsch, *Zeitschrift für physikalische Chemie*, t. XXVII, p. 123, 1898 (*Force électromotrice*).

Heycock et Neville, *Philosophical Transactions*, 1897 (*Fusibilité*).

Osmond, *Comptes Rendus*, 1897 (*Micrographie*).

Roberts-Austen, *Proceedings of the Royal Society*, 1878 (*Fusibilité*).

ARGENT-ÉTAIN

Behrens, *Das Mickroskopische Gefüge der Metalle und Legierungen*, 1894 (*Micrographie*).

Charpy, *Contribution à l'étude des Alliages* (Société d'Encouragement), p. 153 (*Micrographie*).

Gautier, *Contribution à l'étude des Alliages* (Société d'Encouragement), p. 93 (*Fusibilité*).

Herschkowitsch, *Zeitschrift für physikalische Chemie*, t. XXVII, p. 123, 1898 (*Force électromotrice*).

ARGENT-ZINC

Charpy, *Contribution à l'étude des Alliages* (Société d'Encouragement), p. 121 (*Micrographie*).

Gautier, *Contribution à l'étude des Alliages* (Société d'Encouragement), p. 93 (*Fusibilité*).

Herschkowitsch, *Zeitschrift für physikalische Chemie*, t. XXVII, p. 128, 1898 (*Force électromotrice*).

ARGENT ET CADMIUM, ARGENT ET PLOMB

Behrens, *Das mikroskopische Gefüge der Metalle und Legierungen*, 1890 (*Micrographie*).

Gautier, *Contribution à l'étude des Alliages* (Société d'Encouragement), p. 93 (*Fusibilité*).

ARGENT ET ANTIMOINE

Charpy, *Contribution à l'étude des Alliages* (Société d'Encouragement), p. 121 (*Micrographie*).

Gautier, *Contribution à l'étude des Alliages* (Société d'Encouragement), p. 93 (*Fusibilité*).

CHAPITRE XXVI

ALLIAGES D'OR

Les principaux alliages d'or sont :

1° Les alliages d'or et d'argent ;

2° Les alliages d'or et de cuivre;

3° Les alliages ternaires or-argent-cuivre ;

4° Les alliages quaternaires or-argent-cuivre-zinc.

Nous dirons un mot de quelques autres alliages qui ne présentent que très peu d'intérêt.

ALLIAGES D'OR ET D'ARGENT

Étude théorique. — Ces alliages ont été étudiés d'une façon assez complète au point de vue théorique.

Courbe de fusibilité. — La courbe de fusibilité des alliages or-argent a été déterminée par Erhards et Schertel et publiée dans les *Beiblätter der Annalen der Physik und Chemie* (1879). Cette courbe est sensiblement une droite joignant le point de fusion de l'or à celui de l'argent. On est donc conduit à admettre l'existence de mélanges isomorphes.

Métallographie. — La micrographie des alliages d'argent et d'or a été étudiée par Behrens, qui s'exprime de la façon suivante sur ce sujet :

« Les figures de corrosion sur les polissages d'alliages d'or peuvent déceler deux sortes de treillis formés par des lignes sombres sur fond clair ou bien fond sombre avec réseau clair, suivant que l'or élève ou abaisse le point de fusion.

« Dans les alliages or-argent, on trouve toujours un réseau sombre et des champs clairs bombés comme des coussins. Il a dû évidemment se produire une ségrégation d'argent dans les cristaux riches en or, en opposition avec toute hypothèse de mélange isomorphe des deux métaux en proportions indéterminées; 5 0/0 d'or amènent une image déjà nette.

« La teneur d'or augmentant, le réseau devient plus fin et, à la place d'un réseau de mailles, on trouve des lamelles. Jusqu'à 30 0/0 Au, l'attaque se fait à l'acide azotique fort, et ensuite une dissolution forte de cyanure de potassium rend de bons services.

« Pour obtenir des alliages or-argent à surface bien cristallisée, il suffit de fondre au chalumeau la pièce de métal lavée à l'acide sulfurique dilué, bouillant, pour obtenir des cristaux de 1 millimètre. Si l'on veut avoir des formations cristallines plus considérables, on fond 3 à 5 grammes dans un petit creuset de porcelaine ou de graphite. La surface cristallisée montre des saillies bombées, à contour à peu près carré. Du sommet de ces bosses, des nervures déchiquetées ou empennées se dirigent vers les angles des carrés; parfois le sommet est plat sans nervures. Le tout correspond à la constitution dendritique. »

Résistance électrique. — La courbe de conductibilité de ces alliages déterminée par Matthiessen montre qu'elle est bien inférieure à celle qui serait calculée par la règle des mélanges et que l'addition de faibles quantités de l'un des constituants suffit à abaisser considérablement cette conductibilité.

Étude industrielle. — Les alliages d'or et d'argent sont plus durs, plus résistants que les métaux constituants.

La couleur de ces alliages varie avec la teneur en argent et va du jaune au blanc en passant par le vert.

Ce fait est très connu des joailliers et c'est même à cette pro-

priété que ces alliages doivent leurs quelques applications.

L'alliage ayant une composition de

Au................	70 à 73
Ag................	30 à 27

est vert.

Au-delà de 50 0/0 d'argent, les alliages deviennent blancs.

Ces alliages sont utilisés en joaillerie. Ils sont peu employés pour les monnaies. Il faut cependant citer les *souverains de Sydney*.

ALLIAGES D'OR ET DE CUIVRE

Étude théorique. — Ces alliages ont été moins étudiés que les alliages argent-or, bien qu'ils présentent un grand intérêt. Cependant Behrens en a donné quelques caractères micrographiques.

C'est seulement avec les alliages or-cuivre à haute teneur d'or, 50 0/0 et au dessus, qu'on a obtenu des surfaces bien cristallisées. Sur des sections attaquées apparaissent des filaments brillants couleur d'or, sur fond sombre profondément attaqué, conséquence d'un abaissement du point de fusion. L'attaque doit se faire à l'acide azotique. Avec 2 0/0 Au, on obtient déjà un treillis très clair ; avec 10 0/0 Au, un treillis plus fin interrompu par des lamelles. On peut également rendre ces dessins apparents à l'aide des couleurs de revenu, avec 10 0/0 Au ; on les reconnaît sans difficulté avec 5 0/0 Au après allongement au triple des longueur et largeur par laminage ou battage dans le mortier d'acier. S'il est nécessaire, on pousse la coloration au fond jusqu'au vert, alors les filaments sont rouges pendant que les points et les traits en question restent jaunes. Il n'y a pas de doute que l'on ait affaire ici à une deuxième phase de liquation d'un alliage à plus haute teneur d'or dans ces joints.

Matthiessen a déterminé la courbe de conductibilité de ces

alliages; il a trouvé que l'allure était la même que pour les alliages d'or et d'argent, mais que l'augmentation de résistance était encore plus forte que dans ce dernier cas.

Étude industrielle. — Les alliages d'or sont obtenus par fusion des métaux constituants. Cette opération a lieu dans un creuset en plombagine, que l'on a soin de garnir intérieurement de poussier de charbon, du moins quand il est neuf. Ceci a pour but d'empêcher des parties du métal de rester adhérentes aux parois.

Les moules dans lesquels on coule les alliages d'or sont en fer ou en sable ; le plus souvent les joailliers coulent les petites pièces dans des moules pratiqués dans des os de seiche.

Le laminage et l'étirage ne présentent aucune particularité autre que celles qui sont relatives au travail des matières d'un prix élevé.

Les alliages d'or et de cuivre sont très employés. Le cuivre apporte à l'or une certaine dureté, bien que ne diminuant pas sa malléabilité, du moins quand il ne dépasse pas 10 0/0.

A. *Alliages pour joaillerie.* — Les alliages reconnus en France pour la joaillerie sont :

1°	Au	750
	Cu	250
2°	Au	840
	Cu	160
3°	Au	920
	Cu	80

Il n'y a pas en France d'alliages or-cuivre légaux renfermant moins de 747 pour 1000 d'or, puisque la tolérance est de 3 millièmes sur les alliages précédents.

Pour l'exportation, la France reconnaît depuis 1884 un titre plus bas, celui de :

Au	583
Cu	417

Les deux alliages assez employés en Angleterre sont les suivants :

1°	Au.........	916,6 pour 1000
	Cu.........	83,3 —

pour les alliances, les bagues, etc... ;

2°	Au.................	82 à 83
	Cu.................	18 à 17

dit or brun utilisé en joaillerie.

L'Allemagne reconnaît les titres :

1°	Au..................	750
	Cu..................	250
2°	Au..................	583,3
	Cu..................	416,6
3°	Au..................	333,3
	Cu..................	666,6
4°	Au..................	250
	Cu..................	750

L'Autriche admet :

1°	Au....................	767
	Cu....................	233
2°	Au....................	545
	Cu....................	455
3°	Au....................	326
	Cu....................	674

B. *Alliages pour monnaies.* — Les principaux alliages pour monnaies sont résumés dans le tableau suivant :

MONNAIES D'OR

PAYS	DÉNOMINATION	VALEUR AU PAIR	TITRE LÉGAL	POIDS LÉGAL
France	100 francs	100 francs	900	32,25806
	50 —	50		16,12903
	20 —	20		6,45161
	10 —	10		3,22580
	5 —	5		1,61290
Allemagne	20 marks	24,69	900	7,965
	10 —	12,35		3,982
	5 —	6,17		1,991
Angleterre	5 livres	126,10	916,66	39,940
	2 —	50,44		15,976
	Souverain	25,22		7,988
	1/2 souverain	12,61		3,994
Autriche-Hongrie	Quadruple ducat	47,41	986	13,960
	Ducat	11,85		3,490
	20 couronnes	21,00	900	6,775
	10 —	10,50		3,387
Belgique	20 francs	20,00	900	6,452
	10 —	10,00		3,226
Danemark	20 kronen	27,78	900	8,960
	10 —	13,89		4,480

PAYS	DÉNOMINATION	VALEUR AU PAIR	TITRE LÉGAL	POIDS LÉGAL
Espagne	100 pesetas	100,00	900	32,258
	25 —	25,00		8,064
	20 —	20,00		6,452
	10 —	10,00		3,226
Italie	100 lires	100,00	900	32,250
	50 —	50,00		16,129
	20 —	20,00		6,452
	10 —	10,00		3,226
	5 —	5,00		1,613
Norwège	20 kroner	27,78	900	8,960
	10 kroner	13,89		4,480
	5 kroner	6,94		2,240
Pays-Bas	Double ducat	23,54	983	6,988
	Ducat	11,77		3,494
	10 florins	20,76	900	6,720
Portugal	Couronne	56,00	916,66	17,735
	1/2 couronne	28,00		8,868
	1/5 couronne	11,20		3,547
	1/10 couronne (Milreis)	5,60		1,774

Russie	1/2 impériale (avant 1886)	20,66	916,66	6,545
	3 roubles	12,40		3,927
	Impériale (depuis 1886)	10,00	900	12,903
	1/2 impériale —	20,00		6,452
	Impériale (depuis 1897)	40,00		12,903
	10 roubles	26,66		8,602
	1/2 impériale	20,00		6,452
	5 roubles	13,34		4,301
Suède	20 kronor	27,78	900	8,960
	10 —	13,89		4,480
	5 —	6,94		2,240
États-Unis	Double-Aigle	103,65	900	33,436
	Aigle	51,83		16,718
	Demi-Aigle	25,91		8,359
	3 dollars	15,55		5,015
	1/4 d'Aigle	12,95		4,179
	Dollar	5,18		1,672

ALLIAGES D'OR, D'ARGENT ET DE CUIVRE

De tous les alliages d'or, ce sont les plus employés après ceux de cuivre et d'or. Ils sont plus malléables, plus résistants et plus durs que l'or seul.

Les deux débouchés de ces alliages sont :

A. La joaillerie;

B. La soudure pour or.

A. *Alliages pour joaillerie et bijouterie.* — Voici, d'après un travail de Gee (*Goldschmidt Handbook*), la principale composition de ces alliages utilisés en joaillerie (la composition n'est pas centésimale) :

Cu	Ag	Au
1/2	1/2	23
1	1	22
2	2	20
3	3	18
6	3	15
8	3	13
8 1/2	3 1/2	12
10	4	10
10 1/2	4 1/2	9
10 1/2	5 1/2	8
9	8	7

On remarquera que la composition se rapporte à 24 parties. Ceci provient de ce que l'or pur est nommé or 24 carats.

L'un des alliages les plus employés est l'alliage à 9 parties d'or, c'est-à-dire l'or 9 carats.

L'or 12 carats et ceux à 12 1/2 et 13 sont aussi très usités comme or clair.

Les alliages les plus usités en Angleterre sont les suivants (composition non centésimale) :

1°	Au	38,85
	Ag	5,70
	Cu	10,2
2°	Or monnayé	49,60
	Ag	12,30
	Cu	23,60
3°	Or monnayé	31,00
	Ag	38,00
	Cu	27,5

Voici, d'après Knab, la composition correspondant aux diverses couleurs :

COULEUR	Au	Ag	Cu	Fe
Or jaune	1000	»	»	»
Or rouge	750	»	250	»
Or vert	750	250	»	»
Or feuille morte	700	300	»	»
Or vert d'eau	600	400	»	»
Or rose	750	200	50	»
Or bleu	750	»	»	250
Or anglais jaune	750	125	125	»
Or anglais blanc	750	150	100	»
Or anglais plus blanc	750	170	80	»
Or anglais très blanc	750	190	60	»

B. *Alliages pour soudures.* — Les principaux alliages employés comme soudure de l'or sont :

Soudure très bonne qualité :

Au	62,5
Ag	22,5
Cu	15

Soudure qualité moyenne :

Au	50
Ag	30
Cu	20

Soudure qualité inférieure :

Au	42,5
Ag	32,5
Cu	25

On emploie aussi comme soudure des alliages quaternaires dont nous dirons quelques mots.

ALLIAGES D'OR, D'ARGENT, DE CUIVRE ET DE ZINC

Le zinc rend l'or dur et fragile. Mais il n'agit pas de même dans les alliages d'or, d'argent et de cuivre, dans lesquels on a pu en introduire jusqu'à 17 0/0. — Toutefois, le zinc rend généralement l'alliage plus difficile à travailler.

Le zinc est introduit sous forme de laiton.

Ces alliages sont utilisés comme soudures. En voici deux types :

1° Soudure tendre :

Au	11,5
Ag	54,8
Cu	28,2
Zn	5,5

2° Soudure forte :

Au	62,5
Ag	31,3
Cu	6,2

En Angleterre, on fabrique beaucoup d'objets en alliages d'or et de zinc, même sans argent.

ALLIAGES D'OR ET D'ÉTAIN

Ces alliages, quoique peu utilisés, ont été l'objet d'un certain nombre de recherches théoriques.

La courbe de conductibilité a été déterminée par Matthiessen

et présente un maximum correspondant à la combinaison SnAu.

Ce composé a été retrouvé par Laurie, qui a déterminé les forces électromotrices de ces alliages et a montré qu'il y avait une variation brusque de la force électromotrice quand on arrive à la composition SnAu.

AUTRES ALLIAGES D'OR

Le plomb donne des alliages très brisants, même lorsqu'il est en très petites quantités.

On assure que $\frac{1}{2.000}$ de plomb présent dans une barre d'or est suffisant pour permettre de la briser d'un petit coup de marteau. La résistance est considérablement abaissée.

L'antimoine et l'arsenic jouent sensiblement le même rôle.

Le fer est, au contraire, assez intéressant pour être introduit en quantité notable dans certains alliages destinés à l'ornementation.

A ce sujet, Guettier dit, d'après Karstin, que le fer n'a pas d'influence sur la ténacité de l'or, et d'un autre côté il affirme que l'or ne paraît communiquer au fer aucun défaut susceptible d'en altérer la qualité ou d'en gêner la fabrication.

Un alliage de 1 partie d'or, 3 parties de fer atteint son point de fusion à une température au-dessous de celle qui est nécessaire pour fondre le fer.

Un alliage par parties égales or et fer donne un produit grisâtre, cassant et quelque peu magnétique ; un alliage qui contient 1/12 de fer est d'une couleur jaune pâle qui passe au jaune gris, quand on y introduit jusque 1/6 de fer, et qui devient d'un gris blanc quand les proportions atteignent 3 ou 4 atomes de fer pour un d'or.

L'alliage qui contient 1/6 de fer est employé dans la bijouterie sous le nom d'or gris. L'alliage qui admet les 3/5 ou les 4/5 de fer a été essayé pour fabrication d'instruments tranchants.

On a signalé des alliages ayant les compositions suivantes :

1°	Au	66,7
	Fe	33,3

dit or bleu ;

2°	Au	83,3
	Fe	16,7
3°	Au	91,67
	Fe	8,33

Enfin, en terminant ce qui a trait aux alliages d'or, nous tenons à signaler le travail de Roberts-Austen et de M. Osmond, intitulé *Recherches sur la structure des Métaux, sa genèse et ses transformations*, dans lequel les auteurs ont étudié une série d'alliages d'or avec environ 0,2 0/0 de métaux divers. On le trouvera dans le livre de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale : *Contribution à l'étude des alliages métalliques*.

CONCLUSION

Il est difficile de faire actuellement un rapprochement entre la constitution et les propriétés des alliages or-argent-cuivre.

Pour les alliages d'or et de cuivre, les plus usités sont :

1° Ceux contenant de 75 à 92 0/0 d'or pour la joaillerie.

Toutefois, ce titre peut descendre, dans certains pays, à 25 0/0 d'or.

2° Pour les monnaies, de 87 à 92 0/0 environ d'or.

On n'a pas de renseignements précis sur la constitution de ces alliages.

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE XXVI

TRAITÉS GÉNÉRAUX

Annuaire du Bureau des Longitudes (*Monnaies*).
Guettier, *la Fonderie en France* (*Généralités*).
Hiorns, *les Alliages métalliques* (Traduction Boudouard), Steinheil, éditeur (*Généralités*).
Knab, *Traité des Alliages métalliques*, Steinheil, éditeur (*Généralités*).
Krupp, *Die Legierungen*, Vienne, 1894, p. 144 (*Généralités*).
Ledebur, *les Alliages métalliques*, Fritch, 1894 (*Généralités*).
Roberts-Austen et Osmond, *Contribution à l'étude des Alliages* (Société d'Encouragement, p. 00).
Behrens, *Das mikroskopische Gefüge der Metalle und Legierungen*, 1894 (*Micrographie*).
Erhards et Shertel, *Beiblätter der Annalen der Physik und Chemie*, 1879 (*Fusibilité*).

CHAPITRE XXVII

ALLIAGES DE PLATINE ET DES MÉTAUX DE LA MINE DU PLATINE

(PALLADIUM, IRIDIUM, RHODIUM)

ALLIAGES DE PLATINE

Étude théorique. — Les alliages de platine n'ont été que très peu étudiés au point de vue théorique.

On sait cependant que Henri Sainte-Claire Deville et Debray ont pu isoler toute une série de combinaisons de platine et de certains métaux ; d'un alliage de platine avec six fois son poids d'étain, ils ont pu retirer par l'action de l'acide chlorhydrique des cristaux cubiques correspondant à la formule Pt^2Sn^3. De même, ils ont pu obtenir la combinaison Pt^2Zn^3, etc., etc.

De plus, Behrens a étudié par voie micrographique les alliages cuivre-platine et zinc-platine. Voici les renseignements qu'il donne à ce sujet.

« Les alliages cuivre-platine ont la même attitude vis-à-vis des réactifs que les alliages or-argent, des joints profondément attaqués entre des cristaux en forme de coussins, conséquence d'un relèvement du point de fusion par le platine. Toutefois, le cuivre est beaucoup moins garanti contre l'attaque à l'acide azotique par 20 0/0 de platine que l'argent par 10 0/0 or. Avec 2 0/0 platine, le réseau est très grossier ; avec 10 0/0 platine,

il est plus fin qu'avec 10 0/0 Au; avec 20 0/0 il est si fin que l'alliage attaqué décèle même au microscope une structure à grains fins.

« Les alliages zinc-platine ont une attitude toute différente; presque la totalité du platine se sépare à l'état cristallisé en un alliage difficilement fusible (selon Deville et Debray, Pt^2Zn^3, avec 33,4 Zn).

« Sur les polissages attaqués d'un alliage à 10 0/0 Pt, apparaissent très serrés les bâtonnets et aiguilles de cet alliage; sur les polissages d'un alliage à 3 0/0 Pt on voit, après attaque à l'acide sulfurique dilué, de petites cavités irrégulières sur fond brillant, à grain fin, de zinc presque pur, et sur le fond de ces petites cavités des aiguilles, des croix et des rosettes à six branches brunes, à ramifications élégantes, de telle sorte que l'on est autorisé à admettre un système cristallin hexagonal. Les aiguilles brunâtres sont isolées facilement à l'aide de l'acide sulfurique dilué; deux spécimens pris l'un dans un alliage à 10 0/0, l'autre dans un alliage à 13 0/0 renfermaient 38,3 et 37,6 0/0 Zn, ce qui est voisin de la formule $PtZn^2$, qui demande 40 0/0 Zn.

Étude industrielle. — Les seuls alliages de platine utilisés dans l'industrie sont les suivants :

Alliages de platine et de cuivre;
Alliages de platine et d'argent;
Alliages de platine et d'or;
Alliages de platine et d'iridium;
Alliages de platine et de rhodium;
Alliages plus complexes.

Leur préparation exige ordinairement l'emploi de fours spéciaux chauffés au gaz oxhydrique. On commence toujours par faire fondre le platine, et l'on jette, par une ouverture faite dans le couvercle du bassin, lequel est en chaux, toute l'addition nécessaire.

Aussitôt que cette addition a eu lieu, on peut diminuer la température et même souvent laisser refroidir ; l'alliage a, en

effet, presque toujours un point de fusion inférieur à celui du métal pur.

ALLIAGES DE PLATINE ET DE CUIVRE. — Les alliages de platine et de cuivre offrent des qualités qui les rendraient fort intéressants si le platine n'était un métal d'un prix aussi élevé. Ils sont en effet très malléables; d'un autre côté, ils sont très tenaces. Enfin ils offrent une grande résistance aux agents atmosphériques et sont susceptibles d'un beau poli.

La couleur passe du rouge au blanc suivant les proportions de cuivre.

A 20 0/0 de platine, l'alliage est rosé, un peu jaune;

A 50 0/0 de platine, on a une couleur franchement jaune;

A 60 0/0 de platine, l'alliage est sensiblement blanc, mais il est fragile, dur et brisant. Au contraire des deux premiers, il ne peut pas se marteler.

On peut citer comme utilisé dans l'industrie le type suivant, connu sous le nom d'or de Cooper :

Cu..................	18,75
Pt..................	81,25

ALLIAGES DE PLATINE ET D'ARGENT. — Ces alliages sont d'autant plus durs et moins ductiles qu'ils renferment plus de platine. Berthier dit qu'un alliage renfermant 7 0/0 de platine est cassant. Matthey affirme qu'il n'en est rien.

Un alliage à 62,5 0/0 de platine peut se marteler, mais il ne se lamine pas. Il se liquate avec une très grande facilité.

Deux compositions sont seulement à retenir comme alliages industriels.

Les dentistes utilisent un alliage ayant la composition comprise entre :

Pt.................	15 à 35
Ag.................	85 à 65

D'autre part. on utilise comme étalon de résistance élec-

trique un alliage fait par MM. Johnson et Matthey et composé de :

Ag....................	66,7
Pt....................	33,3

Alliages de platine et d'or. — Ces alliages ne présentent que peu d'intérêt; ils ont, en effet, une couleur plus blanche que celle de l'or et ne peuvent être employés que dans des cas très particuliers par la joaillerie.

Cependant on utilise parfois l'alliage

Au....................	95
Pt....................	5

qui offre plus de résistance que l'or seul.

Le même alliage est quelquefois utilisé pour la confection des dentiers.

Alliages de platine et d'iridium. — L'iridium donne au platine une dureté remarquable sans diminuer son inaltérabilité.

Deville et Debray ont étudié les alliages suivants et ont déterminé leurs poids spécifiques.

PLATINE	IRIDIUM	POIDS SPÉCIFIQUES
90	10	21,615
85	15	21,618
66,67	33,33	21,874
5	95	22,384

Les mêmes savants ont aussi étudié la dilatation de certains de ces alliages et ont montré que celui à 10 0/0 d'iridium a même coefficient de dilatation que le mètre original en platine pur qui se trouve aux *Archives Nationales*.

Les alliages de platine et d'iridium ont quelques débouchés intéressants :

1° La construction d'étalons dont le meilleur exemple est celui du mètre, fait en 1870 par MM. Johnson, Matthey et Cie, pour la Commission du Système métrique international ;

2° Les couples thermo-électriques préconisés par M. H. Le Chatelier et qui sont formés de deux fils, l'un de platine, l'autre de platine iridié renfermant 10 0/0 d'iridium.

Le même alliage est utilisé pour doubler le cuivre dans la construction de certains miroirs métalliques, et pour former certains récipients employés dans les laboratoires.

Enfin les constructeurs d'appareils de précision l'utilisent parfois dans leur fabrication.

Alliages de platine et de rhodium. — Ces alliages sont seulement utilisés pour faire les fils de couples thermo-électriques. Ils sont un peu moins cassants, après recuit prolongé et donnent des indications plus constantes que les alliages platine-iridium.

Autres alliages binaires de platine. — Le plomb, l'étain, le bismuth et le cadmium s'allient aisément au platine.

Ils le rendent cassant et inutilisable.

Les alliages platine-nickel ont été peu étudiés.

On a cependant signalé un alliage à 50 0/0 de chacun des métaux constituant qui possède une très grande malléabilité et qui est magnétique.

L'arsenic et l'antimoine ont même action que le plomb.

Alliages complexes de platine. — Parmi ces alliages, il faut citer de suite les *bronzes de platine*, qui sont employés pour différents usages.

Pour des tubes de télescope, on utilise :

Ni	71
Pt	14,5
Sn	14,5

Mais généralement les alliages connus sous ce nom ne renferment que des traces de platine.

Pour des ustensiles de table, on emploie :

Ni	90
Pt	1
Sn	9

Pour des articles de luxe :

Ni	81,5
Pt	0,8
Sn	16
Ag	1,7

Le nom de *platinor* ou or platiné a été donné à un alliage possédant la couleur de l'or et inaltérable; il a pour composition :

Pt	18
Ag	10
Cu	57
Ni	9
Zn	6

Les alliages suivants sont usités par les dentistes :

Pt	6
Au	2
Ag	1

Pt	14
Au	4
Ag	6

Les alliages platine-cuivre-zinc sont assez utilisés. Hiorns donne les compositions suivantes :

Pt	Cu	Zn
29,3	66,7	4
57,7	38,5	3,8
66,7	29,1	3,2
29,1	66,7	4,2

On connaît enfin les alliages de Cooper préconisés pour les plumes à écrire. Le plus employé a pour composition :

Pt	54
Cu	14
Ag	32

ALLIAGES DE PALLADIUM

Le palladium n'est utilisé à l'état d'alliage que dans la confection des montres.

Ceux de ces alliages qui sont employés industriellement possèdent une couleur rouge brun. Ils sont très résistants aux agents atmosphériques et n'offrent pas grande résistance au frottement. Cependant ils ont une dureté remarquable.

Voici la composition de quelques-uns de ces alliages :

1°	Pd	12,5
	Au	37,5
	Ag	23
	Cu	27
2°	Pd	72,0
	Pt	0,5
	Ag	6,5
	Cu	18,5
	Ph	1,0
	Au	1,5
3°	Pd	72,0
	Pt	0,5
	Ag	7,0
	Cu	18,5
	Ni	2,0

Le premier est le plus employé dans la fabrication des montres en Suisse et en Angleterre comme coussinets.

Le magnétisme n'a pas d'action sur ces alliages.

De plus, certains alliages d'argent et de palladium sont utilisés pour construire des échelles d'appareils de précision.

C'est en l'un de ces alliages qu'a été faite la division du grand cercle de l'Observatoire de Paris.

Enfin l'art dentaire utilise certains de ces produits dont le principal est :

Pt........................	42
Pd........................	33
Au........................	25

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE XXVII

Behrens, *Das mikroskopische Gefüge der Metalle und Legierungen*, 1894 (*Micrographie*).

Deville et Debray, *Annales de Chimie et de Physique*, t. LVI (*Etude chimique*).

Hiorns, *les Alliages métalliques* (Traduction Boudouard), Steinheil, 1900, éditeur.

CHAPITRE XXVIII

ALLIAGES DE MANGANÈSE

ALLIAGES MAGNÉTIQUES DE MÉTAUX NON MAGNÉTIQUES

Les principaux alliages de manganèse sont :

Les alliages fer-manganèse et fer-carbone-manganèse que nous avons étudiés dans le chapitre IV sous le nom d'aciers au manganèse, les ferromanganèses et les silico-spiegels, dont nous avons parlé au chapitre V.

Les alliages manganèse-aluminium dont nous allons parler en détail et qui présentent un intérêt tout particulier par leur magnétisme, et certains autres alliages dont l'emploi n'est pas développé.

ALLIAGES DE MANGANÈSE ET D'ALUMINIUM

Étude théorique. — COURBE DE FUSIBILITÉ. — Nous venons de déterminer la courbe de fusibilité des alliages aluminium-manganèse, mais nous n'avons pas encore terminé les analyses

des alliages utilisés. Voici rapportés, *à la mise au creuset*, les points de fusion trouvés :

Al	Mn	Point de fusion
98	2	625
95	5	620
90	10	600
80	20	630
70	30	650
60	40	675
50	50	720
45	55	910
40	60	1140
35	65	1160
30	70	1175
20	80	1220
10	90	1260
5	95	1225

Mais, nous le répétons, ces chiffres ne peuvent être regardés que comme provisoires, les analyses des alliages n'étant pas terminées.

Métallographie (Album, Pl. CII, Phot. 400 à 403). — L'étude micrographique de ces alliages n'est pas encore terminée ; toutefois, les recherches que nous avons faites nous permettent de croire à une combinaison Al-Mn correspondant à environ 15 0/0 de manganèse et à l'existence de deux solutions solides, l'une à teneur moyenne en manganèse (entre 45 et 60 0/0 environ), l'autre à très haute teneur en aluminium (90 à 100 0/0 Al).

Étude chimique. — Nous avons, en 1900, effectué des recherches sur les alliages aluminium-manganèse par voie aluminothermique. Rappelons tout d'abord que Wöhler et Michel préparèrent une combinaison correspondant à la formule $MnAl^3$ en fondant du chlorure de manganèse et de l'aluminium, en présence de chlorure sodico-potassique; ils obtinrent ainsi une poudre cristalline d'un gris foncé.

Dans nos recherches sur ces alliages, nous avons utilisé de l'oxyde manganique Mn^2O^3 aussi pur que nous avons pu le trouver dans le commerce ; nous l'avons réduit par l'aluminium en excès. Les résultats donnés par ces expériences ont été les suivants :

1° La limite d'inflammation correspond à l'expérience dans laquelle on obtiendrait en théorie le composé $MnAl^4$.

Il est impossible d'obtenir des résultats avec des proportions d'aluminium supérieures à celles de cette expérience. En chauffant le creuset, on n'obtient, en effet, que des petites masses métalliques prises dans le corindon et ne pouvant être triées;

2° Dans toutes ces expériences, il se produit des pertes énormes qui ont lieu sous forme de protoxyde de manganèse;

3° Lorsque l'on fait réagir l'aluminium sur l'oxyde manganique suivant les proportions correspondant à $MnAl^4$, on n'obtient qu'une masse de corindon dans laquelle se trouvent répartis des rognons métalliques fort rares d'ailleurs; quelques-uns de ces rognons atteignent cependant un certain volume; ils contiennent alors des cristaux filiformes très nets, dont quelques-uns ont pu être séparés de la masse;

4° Les culots donnés par les proportions théoriques correspondant à $MnAl^3$ et $MnAl^2$ ne paraissent subir aucune altération à l'air; ils semblent tous contenir le composé $MnAl^3$ que nous avons pu isoler;

5° Les culots métalliques obtenus dans les expériences comprises entre celles qui donneraient théoriquement Mn^2Al et Mn^5Al tombent en poussière très rapidement. Ils contiennent tous un composé parfaitement cristallisé que l'on peut séparer de la masse à la main ou sur un tamis et qui correspond à la formule Mn^2Al^3;

5° Aucun des culots préparés dans ces expériences n'est malléable, tous se brisent facilement sous le marteau et peuvent être pulvérisés au mortier d'Abich.

Le composé Mn^2Al^3 est préparé sous forme de cristaux lamellaires extrêmement brillants et de poudre cristalline rappelant la couleur du fer. Le composé $MnAl^3$ est obtenu en poudre très brillante, d'un gris argent. Enfin la combinaison $MnAl^4$ se présente en cristaux d'une finesse extraordinaire. Tous ces composés sont durs et cassants. La densité des deux premiers est :

	Densités trouvées	Densités théoriques
Mn^2Al^3..........	3,92	4
$MnAl^3$...........	3,41	3,39

Tandis que $MnAl^3$ ne paraît subir aucune altération à l'air, Mn^2Al^3 se transforme rapidement en poudre, mais cela sans augmentation de poids. Il faut donc attribuer cette altération à un changement allotropique.

Magnétisme. — Le magnétisme des alliages aluminium-manganèse est particulièrement intéressant à signaler. On ne connaît que trois métaux magnétiques à la température ordinaire : le fer, le nickel et le cobalt. On sait que, portés à une certaine température qui varie avec chaque métal, ces corps deviennent non magnétiques ou, du moins, très peu magnétiques.

D'autre part, on connaît des alliages de métaux magnétiques avec un métal non magnétique qui sont magnétiques; on en connaît de non magnétiques. C'est ainsi que les alliages de fer et d'aluminium sont magnétiques jusqu'à environ 20 0/0 d'aluminium ; ils ne sont pas magnétiques pour une teneur en aluminium plus grande.

On connaît même des alliages de deux métaux magnétiques qui ne sont pas magnétiques, tels certains aciers au nickel.

Mais les alliages aluminium-manganèse constituent le premier exemple d'alliages magnétiques formés de métaux non magnétiques, du moins à la température ordinaire.

On peut trouver trace de la constatation de ce phénomène dans une note qui a passé à peu près inaperçue et qui a été présentée par M. Hogg à la Société Britannique pour l'Avancement des Sciences, en 1892, à Edimbourg.

Les alliages présentés par M. Hogg ont été obtenus en fondant du ferro-manganèse avec de l'aluminium. On utilisait environ 22 kilogrammes de ferro-manganèse à 82 0/0 de manganèse et 2^{kg},5 d'aluminium. Les alliages obtenus étaient magnétiques.

La question a été reprise par M. Heustler, dont le premier mémoire a été lu, le 12 juin 1903, à la Société allemande de Physique.

Les alliages magnétiques présentés par M. Heustler étaient les suivants :

Manganèse-aluminium;
Manganèse-antimoine;
Manganèse-étain;
Manganèse-bismuth;
Manganèse-arsenic;
Manganèse-bore.

De plus, l'on a étudié de très nombreux alliages cuivre-manganèse-aluminium qui jouissent des mêmes propriétés. M. Heustler affirme de suite :

« On voit que nous pouvons désormais obtenir des bronzes magnétiques de faibles hystérèses, selon toute apparence avec une susceptibilité d'aimantation qui atteint en nombre rond les 2/3 de celle de la fonte. »

La découverte de ces alliages magnétiques est due au plus grand des hasards : M. Heustler s'occupait des recherches sur les bronzes de manganèse à la Isabellenhütte, à Dillenbourg.

Il remarqua qu'un alliage de manganèse, d'étain et de cuivre adhérait à un outil qui était devenu accidentellement magnétique.

Ce fut le point de départ de recherches que nous rappellerons très succinctement.

Tout d'abord on a établi que l'alliage de cuivre à 30 0/0 de manganèse (cupro-manganèse du commerce) ne possède pas le moindre magnétisme, même quand il renferme 1,2 0/0 de fer. Le magnétisme devait donc être la conséquence de l'alliage avec l'étain, et alors s'est élevée la question de savoir si d'autres substances n'étaient pas susceptibles de produire le même effet. Le carbone, le silicium, le phosphore furent sans effet; le cas était tout autre avec l'arsenic, l'antimoine, le bismuth (qui est diamagnétique) et surtout avec l'aluminium. De nou-

velles recherches furent faites sur les alliages aluminium-manganèse. On avait d'ailleurs trouvé de nombreuses difficultés à préparer et étudier les alliages avec l'antimoine et le bismuth.

On reconnut qu'avec les alliages aluminium-manganèse l'effet maximum était atteint avec l'alliage renfermant un atome de manganèse et un atome d'aluminium.

Lorsqu'on considère les alliages renfermant du cuivre, la susceptibilité de ces produits augmente notablement avec la teneur croissante en MnAl. Voici, d'ailleurs, les chiffres que l'on a obtenus :

H étant égale à 100, on a, avec :

28,8 0/0 MnAl................	$\beta = 3{,}200$
36,6 0/0 MnAl................	$\beta = 4{,}650$
39,7 0/0 MnAl................	$\beta = 5{,}300$

De faibles additions d'autres métaux n'ont eu le plus souvent qu'une influence assez insignifiante ; une addition de plomb a même occasionné une amélioration sensible ; par exemple, avec un alliage Mn-Al à 36,1 0/0, l'addition d'une faible quantité de plomb a fait monter l'induction du champ de force. On a pu obtenir ainsi avec $H = 150$:

β............. 5,600 à 6,500

L'alliage étain-manganèse avec la composition qui donne le meilleur résultat (3 atomes de manganèse pour 1 atome d'étain) a donné avec le même champ de force ($h = 150$) une induction d'environ 1500.

Si l'on considère l'un de ces alliages magnétiques et qu'on élève sa température, on le voit perdre ses propriétés mécaniques à une certaine température (point de transformation).

Celle-ci est d'autant plus élevée pour les alliages cuivre-manganèse-aluminium que la teneur en manganèse-aluminium (ceux-ci étant maintenus dans le rapport MnAl) est plus grande. Elle est supérieure à 300°, lorsque cette teneur est supérieure à 39 0/0.

Le point de transformation peut être considérablement abaissé par des additions de matières étrangères ; c'est ainsi qu'une très faible addition de plomb abaisse de 160° à 60 ou 70° la température de transformation d'un alliage à 24 0/0 de manganèse-aluminium.

On peut, de plus, améliorer considérablement ces alliages au point de vue magnétique en les portant à 110° (température d'ébullition du toluol).

Il est à retenir, enfin, que les alliages cuivre-manganèse-aluminium sont très mauvais conducteurs de l'électricité.

Étude industrielle. — Fabrication. — Les alliages aluminium-manganèse s'obtiennent en partant d'aluminium et de manganèse notamment, de manganèse aluminothermique.

On a aussi préparé ces alliages au four électrique par le procédé Langley, qui consiste à réduire en même temps la cryolithe et l'oxyde de manganèse.

Les alliages cuivre-aluminium-manganèse se préparent, comme nous l'avons dit, en partant d'aluminium et de cupromanganèse.

Propriétés. — Lorsqu'on ajoute du manganèse à l'aluminium, on augmente sa charge de rupture. Voici quelques résultats sur métal coulé en sable :

Composition		Propriétés mécaniques	
Al	Mn	R	A 0/0
99,92	0	10,2	7
99,51	0,42	11,5	6
99,03	0,84	13,2	6
98,21	1,65	14,6	6
97,07	2,73	15,3	5

Mais au-delà de 10 0/0 de manganèse, ces alliages deviennent durs et fragiles. De plus, entre 30 et 80 0/0 d'aluminium, ils s'altèrent très rapidement et tombent en poussière.

Les alliages à basse teneur en manganèse sont très peu altérés par les agents chimiques, notamment par l'eau salée.

Utilisations. — Les alliages à basse teneur en manganèse commencent à être utilisés pour l'industrie automobile, la carrosserie, etc. Ils présentent des avantages très notables, croyons-nous, sur les autres alliages légers d'aluminium et, s'ils ne sont pas plus répandus, on ne peut l'attribuer qu'à l'ignorance des fondeurs d'aluminium qui, pour la plupart, s'acharnent à faire des alliages aluminium-cuivre.

Quant aux alliages magnétiques, on ne peut songer à les utiliser qu'à l'état d'alliages cuivre-aluminium-manganèse, et ceux-ci, jusqu'à maintenant du moins, paraissent être une curiosité scientifique plutôt qu'un produit industriel intéressant.

ALLIAGES DE MANGANÈSE ET DE NICKEL ET DE MANGANÈSE ET DE COBALT

Deux hypothèses sont possibles pour expliquer le magnétisme de certains alliages de manganèse :

Ou le manganèse est magnétique à basse température et l'addition de corps étrangers a pour effet de relever le point de transformation au-dessus de la température ordinaire. On sait que de nombreux éléments, et notamment l'aluminium, surélèvent les points de transformation des aciers.

Ou le manganèse et le corps mis en présence sont susceptibles de donner naissance à une combinaison qui est magnétique, bien que formée de métaux non magnétiques.

Nous avons pensé qu'un examen détaillé des alliages de manganèse et de nickel, de manganèse et de cobalt permettrait peut-être de serrer le problème de plus près en indiquant la variation de position du point de transformation magnétique avec la composition de l'alliage.

Bien que cette étude ne soit pas achevée, nous dirons de suite que les alliages renfermant plus de 55 0/0 de nickel sont magnétiques, que jusqu'ici les expériences que nous avons faites pour déterminer le point de transformation des alliages non magnétiques à la température ordinaire sont restées infruc-

tueuses. Pour les alliages de manganèse et de cobalt, ils sont magnétiques jusqu'à une teneur de 35 0/0 de cobalt; ajoutons que, pour les alliages de nickel et de manganèse, nous avons obtenu les points de transformation suivants :

Ni 0/0	Points de transformation	Ni 0/0	Points de transformation
89,25	270	63,75	155
77,00	245	58,00	125
75,00	220	51,00	100
64,50	175		

Le lieu de ces points est sensiblement une droite. Si on la prolonge, on trouve que le manganèse est magnétique à — 325°, au-dessous du zéro absolu.

Mais ces recherches ont besoin d'être beaucoup précisées, notamment en s'aidant de la micrographie. Nous donnerons ultérieurement des résultats plus détaillés.

Au point de vue des propriétés mécaniques, les alliages qui renferment plus de 20 0/0 de nickel et moins de 45 0/0 de nickel sont durs et assez malléables. Ce résultat est assez bizarre.

Autres alliages de manganèse. — Il faut encore citer, comme alliages de manganèse, ceux avec le titane. Ces produits sont préparés par aluminothermie et renferment généralement 30 à 35 0/0 de titane; ils sont utilisés en fonderie, pour les moulages d'acier.

CONCLUSIONS

Les alliages de manganèse qui, en dehors des aciers, des ferro-manganèses, des bronzes et des laitons au manganèse intéressent l'industrie, sont fort peu nombreux. Il faut, toutefois, mentionner les alliages aluminium-manganèse à très faible

teneur en ce métal. Ces alliages sont constitués par une solution aluminium-manganèse.

Ils sont plus durs, plus faciles à travailler et plus résistants que l'aluminium et très peu altérables.

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE XXVIII

Guillet, *Bulletin de la Société d'Encouragement*, août 1902 (*Étude chimique*); — *Génie civil* (*Étude chimique*); — Thèse de doctorat, Renouard, éditeur (*Étude chimique*).

Heustler, Société allemande de Physique, 12 juin 1903.

Hogg, Société britannique pour l'Avancement des Sciences, 1892 (*Magnétisme*).

CHAPITRE XXIX

ALLIAGES DIVERS

Au cours de cette longue étude sur les alliages, on trouvera épars de nombreux renseignements sur les alliages de divers métaux. Pour en rendre les recherches faciles, nous rappellerons ici les chapitres dans lesquels il en a été question, et nous dirons en quelques mots les résultats déjà obtenus avec quelques alliages dont nous n'avons pas encore parlé.

Alliages de chrome :

Aciers au chrome, chapitre IV ;

Ferro-chrome, chapitre V ;

Cuivre-chrome, chapitre XI ;

Aluminium-chrome, chapitre XXI ;

Alliages de tungstène :

Aciers au tungstène, chapitre IV ;

Ferro-tungstène, chapitre V ;

Cuivre-tungstène, chapitre IX ;

Aluminium-tungstène, chapitre XXI ;

Alliages de molybdène :

Aciers au molybdène, chapitre IV ;

Ferro-molybdènes, chapitre V ;

Aluminium-molybdène, chapitre XXI.

Quelques alliages molybdène-nickel et molybdène-cobalt ont été étudiés par Sargent (*Journal American Chemical Society*,

XXII, 783, 1900) ; ils étaient obtenus par réduction des oxydes au four électrique.

Stavenhagen et Schuchard ont pu obtenir une combinaison WMo en réduisant un mélange d'oxydes au four électrique (*Bulletin de la Société de Chimie*, XXVIII, 518, 1902). Les mêmes savants ont préparé quelques alliages uranium-molybdène par alumino-thermie. Ils ont aussi isolé le composé MoPb.

Alliages de vanadium :

Aciers au vanadium, chapitre IV ;

Ferro-vanadium, chapitre V ;

Bronzes au vanadium, chapitre VIII ;

Laitons au vanadium, chapitre X ;

Cupro-vanadium, chapitre XII ;

Aluminium-vanadium et étain-vanadium sur lesquels on a peu de données.

M. Hélouïs a cependant étudié quelques alliages d'aluminium-vanadium.

Un alliage simplement coulé et renfermant 1 0/0 de vanadium aurait donné :

R........................	17
A 0/0....................	7

Un alliage de vanadium contenant du cuivre, de l'aluminium et du cobalt aurait fourni :

R..................	42 à 45

M. Moissan a préparé de l'aluminium renfermant 0,025 0/0 de vanadium ; l'alliage obtenu était très malléable et peu dur.

D'autre part, on a écrit, de différents côtés, que les alliages étain-vanadium donnaient des résultats extrêmement intéressants. Nous ne croyons pas qu'on ait jamais cité d'analyses et d'essais mécaniques appuyant cette opinion.

Alliages de titane. — Nous avons étudié :

Les aciers au titane, chapitre IV ;

Les ferro-titanes, chapitre v;

Les alliages d'aluminium et de titane, chapitre xxi ;

Les alliages de manganèse et de titane, chapitre xxviii.

Ce sont là les seuls alliages de titane un peu étudiés.

Alliages d'uranium. — Ces alliages n'ont pas été étudiés; cependant il a été isolé quelques combinaisons métalliques de l'uranium, notamment avec l'aluminium.

Alliages de silicium :

Aciers au silicium, chapitre iv;

Ferro-silicium, chapitre v;

Silico-spiegel, chapitre v;

Bronzes au silicium, chapitre viii;

Laitons au silicium, chapitre x;

Cupro-silicium, chapitre xii.

Mais il y a quelques autres alliages de silicium qui ont été étudiés. Nous citerons :

1° Les alliages de silicium et de cobalt étudiés par M. Vigouroux et par M. Lebeau, qui ont pu isoler une série de combinaisons absolument semblables à celles des siliciures de fer: $SiCo^2$, SiCo et Si^2Co (Vigouroux, *Annales de Chimie et de Physique*, 1897, p. 153; — et Lebeau, *Annales de Chimie et de Physique*, octobre 1902);

2° Les alliages de silicium et de chrome, préparés par MM. Lebeau et Figueras, qui ont isolé les combinaisons : $SiCr^3$, $SiCr^2$, Si^2Cr^3 et Si^2Cr (*Bulletin de la Société chimique de Paris*, t. XXIX, 1903).

Il est bon enfin de rappeler que le carborundum est une combinaison de silicium et de carbone obtenue au four électrique par M. Moissan, en partant d'un mélange soit de carbone et de silicium, soit de carbone et de silice.

Ce composé de formule SiC est préparé sur une grande échelle en Amérique et en France, aux usines de la Bathie.

Le carborundum est utilisé pour la confection des meules, la fabrication de pâtes à polir, etc. Il jouit, en effet, d'une très grande dureté.

Depuis quelque temps on cherche, de plus, à utiliser ce pro-

duit en lieu et place des ferro-siliciums. Il a déjà donné des résultats intéressants.

Alliages de bore :

Aciers au bore, chapitre IV ;

Ferro-bore, chapitre V.

Il a été encore étudié un certain nombre de borures qui n'ont pas d'intérêt industriel.

Alliages de phosphore. — Nous avons étudié :

Les alliages de phosphore et de fer au chapitre VI ;

Les alliages de phosphore et de cuivre, chapitre XII ;

Les alliages de phosphore et d'étain, sur lesquels très peu de recherches ont été faites, au chapitre XIII ;

Les bronzes et les laitons phosphoreux, aux chapitres VIII et X.

Il est à noter que l'on a étudié au point de vue chimique quelques autres phosphures métalliques ; mais ils n'ont aucun intérêt industriel.

Alliages d'arsenic. — Nous avons donné au chapitre XIII les recherches qui ont été faites sur les alliages arsenic-cuivre. C'est la seule étude systématique que nous connaissions sur les alliages d'arsenic. Il est bon, toutefois, de rappeler qu'un grand nombre d'arséniures métalliques ont pu être préparés. Nous citerons l'arséniure de fer FeAs.

En terminant, il ne nous semble pas inutile de rappeler que le four électrique a permis d'isoler un grand nombre de carbures métalliques, dont certains peuvent entrer dans la constitution des produits métallurgiques.

CHAPITRE XXX

RÉSUMÉ

Nous résumerons l'étude que nous venons de présenter par trois tableaux, dont le premier rappellera les principales constantes des métaux industriels; le second, la constitution des alliages binaires; le troisième, la composition, la constitution, les propriétés et l'utilisation des principaux alliages actuellement employés dans l'industrie.

Dans ce dernier tableau, nous avons cherché à mieux montrer encore la relation étroite qui lie les propriétés et la constitution des alliages que nous n'avons pu le faire à la fin de chaque chapitre.

MÉTAUX INDUSTRIELS

(L'ORDRE ADOPTÉ EST L'IMPORTANCE INDUSTRIELLE)

NOM	SYMBOLE	POIDS ATOMIQUE	POINT DE FUSION	DENSITE
Fer..............	Fe	55,9	1500	7,86
Cuivre...........	Cu	63,4	1065	8,91 à 8,95
Zinc.............	Zn	65,3	419	6,80 à 7,20
Etain............	Sn	118,5	232	7,28 à 7,29
Plomb............	Pb	207	326	11,30 à 11,44
Nickel...........	Ni	58,7	1470	8,27 à 8,82
Aluminium	Al	27,1	657	2,56 à 2,67
Bismuth	Bi	208,5	267	9,75 à 9,82
Antimoine	Sb	120	631	6,70 à 6,86
Cadmium	Cd	112,4	322	8,60 à 8,70
Mercure	Hg	200,3	— 39,4	13,59
Manganèse.......	Mn	55	1245	7,13 à 7,20
Argent...........	Ag	107,6	962	10,47 à 10,59
Or...............	Au	197,2	1064	19,50
Platine	Pt	194,4	1710	21,15 à 21,70
Magnésium.......	Mg	24,3	651	1,75
Chrome..........	Cr	52,1	?	6,4 à 6,8
Cobalt...........	Co	59	1530	8,51 à 8,88
Vanadium........	Va	51,3	?	5,5
Tungstène	W	184	?	18,7
Molybdène	Mo	96	?	9,01
Palladium........	Pd	106	1550	11,40 à 12,10
Rhodium.........	Rh	103	?	12,10 à 12,26
Iridium	Ir	193	1950(?)	22,42
Ruthénium.......	Ru	101,7	?	12

I. — CONSTITUTION DES ALLIAGES

A. — ALLIAGES DE FER

DÉSIGNATION	COMPOSITION	CONSTITUTION	MÉTHODES UTILISÉES	OBSERVATIONS
		1° ALLIAGES FER-CARBONE. — ACIERS ORDINAIRES		
Aciers non trempés	De 0 à 0,850 0/0 C C > 0,850	Ferrite et perlite Perlite et cémentite	Micrographie, etc. id.	La ferrite dimin. quand C croît. La cémentite croît avec C.
	Existence possible d'un composé spécial la *ferronite* dans les aciers à 0,500 < C < 0,800 (Benédicks)			
Aciers trempés		Fer β, fer γ, martensite	Micrographie Courbes de refroidissement Résistance électrique, etc.	Voir le texte pour les circonstances de production de ces constituants.
id.		Troostite, sorbite, cémentite		
		2° ACIERS SPÉCIAUX TERNAIRES (NON TREMPÉS)		
Aciers au nickel	C = 0,120 Ni = 0 à 10 0/0 C = 0,120 Ni = 10 à 27 0/0 C = 0,120 Ni > 27 0/0	Perlite Martensite Fer γ	Micrographie » »	Ni est en solution dans le fer. Il existe une zone perlite et martensite. Il existe une zone martensite + fer γ.
	C = 0,800 Ni = 0 à 5 0/0 C = 0,800 Ni = 5 à 15 0/0 C = 0,800 Ni > 15 0/0	Ferrite Martensite Fer γ	» » »	Mêmes remarques que plus haut id.
Aciers au manganèse	C = 0,200 Mn = 0 à 5 0/0 C = 0,200 Mn = 5 à 12 0/0 C = 0,200 Mn > 12 0/0	Perlite Martensite Fer γ	Micrographie » »	Mn est probablement dans la perlite.
	C = 0,800 Mn = 0 à 3 0/0 C = 0,800 Mn = 3 à 7 0/0 C = 0,800 Mn => 7 0/0	Perlite Troostite Fer γ	» » »	

Aciers au chrome	C = 0,200 Cr = 0 à 7 0/0	Perlite	Micrographie	Cr est probablement dans la perlite.
	C = 0,200 Cr = 7 à 15 0/0	Martensite	»	
	C = 0,200 Cr = 15 à 20 0/0	Martensite et Carbure double	»	
	C = 0,200 Cr > 20 0/0	Carbure double	»	
	C = 0,800 Cr = 0 à 3 0/0	Perlite	»	
	C = 0,800 Cr = 3 à 7 0/0	Troostite	»	
	C = 0,800 Cr = 7 à 18 0/0	Martensite et carbure double	»	
	C = 0,800 Cr > 18 0/0	Carbure double	»	
Aciers au tungstène	C = 0,200 W = 0 à 10 0/0	Perlite	Micrographie	W paraît entrer dans la perlite.
	C = 0,200 W => 10 0/0	Carbure double	»	
	C = 0,800 W => 0 à 5 0/0	Perlite	»	
	C = 0,800 W => 5 0/0	Carbure double	»	
Aciers au molybdène	C = 0,200 Mo = 0 à 2 0/0	Perlite	»	Mo paraît entrer dans la perlite.
	C = 0,200 Mo > 2 0/0	Carbure double	»	
	C = 0,800 Mo = 0 à 1 0/0	Perlite	»	
	C = 0,800 Mo > 1 0/0	Carbure double	»	
Aciers au vanadium	C = 0,200 Va = 0 à 0,7 0/0	Perlite	»	Va semble en solution dans Fe.
	C = 0,200 Va = 0,7 à 3 0/0	Perlite et carbure	»	
	C = 0,200 Va > 3 0/0	Carbure	»	
	C = 0,800 Va = 0 à 0,5 0/0	Perlite	»	
	C = 0,800 Va = 0,5 à 7 0/0	Perlite et carbure	»	
	C = 0,800 Va > 7 0/0	Carbure	»	
Aciers au silicium	Si = 0 à 5 0/0	Perlite	»	La constitution est indépendante du C.
	Si = 5 à 7 0/0	Perlite et graphite	»	Si est en solution dans Fe ou forme un composé défini Fe^2Si, FeSi ou $FeSi^2$.
	Si > 7 0/0	Tout le carbone à l'état de graphite	»	

3° ALLIAGES UTILISÉS EN SIDÉRURGIE

Ferro-Manganèses	Mn < 25 0/0 spiegel renfermant carbure double	Micrographie, Analyse chimique	
	Mn > 25 0/0 ferromanganèse proprement dit, même constitution	»	

DÉSIGNATION	COMPOSITION	CONSTITUTION	MÉTHODES UTILISÉES	OBSERVATIONS
Ferro-siliciums	Si < 20 0/0 20 < Si < 50 Si > 50	renferment Fe^2Si » FeSi » $FeSi^3$	Analyse chimique, micrographie, etc.	
Silico-spiegels		renferment MnSi	Analyse chimique	
Ferro-chromes	Cr = 30 à 99 C = 0,2 à 9 0/0	renferment un carbure double dont la teneur en Cr semble variable.	Analyse chimique, micrographie.	L'étude de ces alliages n'est pas assez avancée pour qu'on puisse se prononcer entièrement sur leur constitution.
Ferro-tungstènes	W = 64 à [illegible]0 C = 1,5 0/0 environ	renferment un carbure double de teneur en W variable.	Analyse chimique, micrographie.	
Ferro-molybdènes	Mo = 52 à 85 C = 0,3 à 3 0/0	renferment un carbure double de teneur en Mo variable.	Analyse chimique, micrographie.	
Ferro-vanadium	Renferment un carbure de vanadium ou un carbure double.		Analyse chimique, micrographie.	
		4° ALLIAGES DE FER		
Fer-cuivre	0 < Fe < 2,73 0/0 2,73 < Fe < 92 Fe > 92	1re Solution 2e Solution 3e Solution	Micrographie, Analyse » »	
Fer-étain		Un composé défini très dur		Étude incomplète.

Fer-antimoine				Non étudié.
Fer-zinc	Fe < 8 0/0 Fe > 8	Zn + eutectique Zn — (Combinaison Zn — Fe) Alliages hétérogènes	» »	
Fer-phosphore	0 < Ph < 1,70 1,70 < Ph < 10,20 10,20 < Ph < 15,58 15,58 < Ph < 21,61 21,68 < Ph < 24	Solution Fe — Ph Solution Fe — Ph + eutectique Fe^3P + même eutectique $Fe^3P + Fe^2P$ Fe^2P + un autre constituant non déterminé	» » » »	

B. — ALLIAGES DE CUIVRE

1° ALLIAGES DE CUIVRE ET D'ÉTAIN : BRONZES ORDINAIRES

Cuivre-étain	0 < Sn < 8 8 < Sn < 32 32 < Sn < 38 38 < Sn < 65 65 < Sn < 94 94 < Sn < 100	Solution α renfermant de 0 à 9 0/0 Sn Sol. α + Cu^4Sn ou nouvelle solution Cu^4Sn ou nouvelle solution + Cu^3Sn Cu^3Sn + CuSn Cu^3Sn + CuSn + Sn CuSn + Sn	Micrographie, résistance électrique, fusibilité, force électromotrice, dilatation, densité, etc.	Il n'est question ici que de bronzes refroidis lentement. Pour les bronzes trempés, se reporter au diagramme du chapitre VII, p. 456.

2° BRONZES SPÉCIAUX

L'étude de la constitution des bronzes spéciaux n'est pas suffisamment avancée pour qu'on la puisse préciser.

3° ALLIAGES DE CUIVRE ET DE ZINC : LAITONS ORDINAIRES

Cuivre-zinc	0 < Zn < 36	Solution α	Micrographie, courbes de fusibilité et de refroidissement, etc.	La solution α renfermerait de 64 à 100 0/0 de cuivre. Jusqu'ici on admettait : Sol. β = ZnCu. La solution β contient de 51 à 53,5 0/0 Cu. La solution γ renferme de 31 à 40 0/0 Cu. La solution ε était regardée comme le composé Zn^2Cu. D'après Shepherd elle peut contenir de 13 à 19 0/0 de Cu. On a admis dans les alliages à très fortes teneurs en zinc le composé Zn^4Cu.
	36 < Zn < 46,5	Solution α + solution β		
	46,5 < Zn < 49	Solution β		
	49 < Zn < 60	Solution β + solution γ		
	60 < Zn < 69	Solution γ		
	69 < Zn < 81	Solution γ + solution ε		
	81 < Zn < 87	Solution ε		
	87 < Zn < 97,5	Solution ε + solution η		
	97,5 < Zn < 100	Solution η (0 à 2,5 0/0 Cu)		

DÉSIGNATION	COMPOSITION	CONSTITUTION	MÉTHODES UTILISÉES	OBSERVATIONS
		4° LAITONS SPÉCIAUX		
Laitons au plomb	0 < Pb < 8	Pb garde son entité et entoure les grands cristaux de laitons forgeables pour Cu = 62 à 65,	Micrographie	Au-delà de 8 0/0, il y a ségrégation.
Laitons à l'étain	0 < Sn < 10	L'étain forme un composé spécial et détruit d'abord la solution β dans les laitons contenant α + β.	»	
Laitons au manganèse	0 < Mn < 10	Le manganèse relève légèrement le titre de l'alliage.	»	
Laitons à l'Al	0 < Al < 10	L'aluminium abaisse nettement le titre de l'alliage	»	
Autres Laitons		Voir l'appendice	»	
		5° ALLIAGES DE CUIVRE ET D'ALUMINIUM		
Cuivre-aluminium	0 < Al < 8,6 8,6 < Al < 11,8 11,8 < Al < 15,5 15,5 < Al < 30 30 < Al < 44,5 44,5 < Al < 50 50 < Al < 66 66 < Al < 100	Sol. α Sol. α + β β + Sol. δ Sol. δ ε + Sol. η η_1 η + eutectique η — H H + eutectique η — H	Courbe de fusibilité. Courbe de refroidissement Micrographie Dilatation Étude chimique	α = Sol. contenant 0 à 8 0/0 Al. β = Cu^3Al. δ = Sol. cont. ε = CuAl η = CuAl H = Al ou Sol. AlCu à tiers, faible teneur en Cu. Par trempe des alliages renfermant de 15,5 à 8,6 0/0, on obtient une sol. γ.
		6° AUTRES ALLIAGES DE CUIVRE		
Cuivre-manganèse	0 < Mn < 50	Solution cuivre-manganèse + eutectique	Fusibilité, Micrographie	L'étude faite par M. Lewis manque de précision sur certains points.
	50 < Mn	Combinaison qui paraît correspondre à Mn = 90	»	

Cuivre-antimoine	$0 < Cu < 25$ $25 < Cu < 51$ $50 < Cu < 100$	Cristaux de Sb + eutectique Sb-$SbCu^2$ Cristaux de $SbCu^2$ + eutectique Sb — $SbCu^2$ Constitution dépendant de la vitesse de refroid.	Fusibilité Courbes de refroidissement Micrographie Dilatation Dureté, etc.	M. Baykoff a montré que les transformations subies par les alliages renfermant Cu > 51 0/0 proviennent de formation de solutions solides, du polymorphisme de $SbCu^3$ et de la transformation de $SbCu^3$ en $SbCu^2$.
Cuivre-plomb		Il y a désaccord entre la courbe de fusibilité et la micrographie. La première indique une combinaison ou une solution; la deuxième montre simplement du plomb et du cuivre séparés (Voir l'*Appendice*).	Courbe de fusibilité Micrographie	La trempe a une influence très nette sur la répartition du plomb; le métal est beaucoup plus homogène après un refroidissement rapide.
Cuivre-bismuth		Il y a désaccord entre les diverses méthodes : La micrographie montre une solution Cu — Bi + des cristallites de cuivre. La courbe de fusibilité semble indiquer une combinaison.	Courbe de fusibilité Micrographie	
Cuivre-phosphore	$0 < P < 10$ $10 < P < 15$	Cu + eutectique Cu-Cu^6P^2 Cu^6P^2 + » Cu-Cu^6P^2	Courbe de fusibilité Micrographie	
Cuivre-silicium	$0 < Si < 15$ $15 < Si < 40$	Solution Cu — Si + eutectique Si Cu^2 + eutectique	Courbe de fusibilité Micrographie Étude chimique	Parfois dans les alliages à basse teneur en Si, on rencontre deux solutions.
Cuivre-vanadium	$0 < Va < 7$ $7 < Va < 13$ $13 < Va < 25$	Solution Cu — Va Solution Cu — Va + Combinaison non déterminée Alliages hétérogènes	Micrographie	La combinaison moins dense se sépare de la masse et remonte à la surface.

DÉSIGNATION	COMPOSITION	CONSTITUTION	MÉTHODES UTILISÉES	OBSERVATIONS
Cuivre-chrome	55 < Cu < 100	Cu + Cr	Micrographie Étude chimique	Il ne paraît pas exister de solution Cu-Cr ou Cu-W.
Cuivre-tungstène	55 < Cu < 100	Cu + W	Micrographie Étude chimique	
Cuivre-arsenic	0 < As < 19,2 19,2 < As < 28,34 As = 32,19 32,19 < As < 37,24 37,24 < As	Solution solide Cu + As solution solide Cu^3As Cristaux Cu^3As + eutectique » » Cu^3As Composé Cu^5As^2 Cu^5As^2 + eutectique $Cu^5As^2Cu^2As$ Constitution non précisée	Fusibilité » Micrographie »	Cu^3As est bleu pâle. Cu^5As est rouge pourpre. Cu^2As est blanc bleuté. Il existerait probablement Cu^3As^2.
		C. — ALLIAGES D'ÉTAIN		
Étain-zinc	0 < Zn < 8 8 < Zn < 100	Sn + eutectique Sn — Zn Zn + eutectique Sn — Zn	Courbe de fusibilité Micrographie	
Étain-plomb	0 < Pb < 37 37 < Pb < 100	Sn + eutectique Sn — Pb Pb + eutectique Sn — Pb	Courbe de fusibilité Micrographie	
Étain-cadmium	0 < Cd < 50 50 < Cd < 100	Sn + eutectique Sn — Cd Cd + eutectique Sn — Cd	Courbe de fusibilité Micrographie	
Étain-antimoine	0 < Sb < 8 8 < Sb < 50 50 < Sb < 100	Solution solide Cristaux SbSn Solution solide Sb — SbSn		
Étain-bismuth	0 < Bi < 55 55 < Bi < 100	Sn + eutectique Sn — Bi Bi + eutectique Sn — Bi	Courbe de fusibilité Micrographie	

		D. — ALLIAGES DE PLOMB		
Plomb-antimoine	0 < Sb < 13 13 < Sb < 100	Pb + eutectique Sb — Pb Sb + eutectique Sb — Pb	Fusibilité Micrographie	Voir le texte, p. 846, au sujet de la trempe de ces alliages.
Plomb-bismuth	0 < Bi < 55 55 < Bi < 100	Pb + eutectique Bi — Pb Bi + eutectique Bi — Pb	Courbe de fusibilité Micrographie	
Plomb-cadmium	0 < Cd < 25 25 < Cd < 100	Pb + eutectique Cd — Pb Cd + eutectique Cd — Pb	» »	
		E. — ALLIAGES DE CADMIUM		
Cadmium-zinc	0 < Zn < 10 10 < Cd < 100	Cd + eutectique Zn — Cd Zn + eutectique Zn — Cd	» »	
		F. — ALLIAGES DE ZINC		
Zinc-antimoine	0 < Sb < 2,5 2,5 < Sb < 55 55 < Sb < 62,5 62,5 < Sb < 64,5 64,5 < Sb < 79 79 < Sb < 100	Zn + 1er eutectique 1re combinaison + 1er eutectique 1re combinaison + 2e eutectique 2e combinaison + 2e eutectique 2e combinaison + 3e eutectique Sb + 3e eutectique	Micrographie Courbe de fusibilité	Les formules des combinaisons semblent assez complexes.
Zinc-bismuth	0 < Zn < 4 4 < Zn < 18 18 < Zn	Zn + eutectique Combinaison définie + eutectique Alliages hétérogènes	Micrographie Courbe de fusibilité	Il existe une combinaison qui n'est pas miscible en toutes proportions avec le zinc.
		G. — ALLIAGES D'ANTIMOINE		
Antimoine-bismuth	0 < Sb < 100	Ces alliages sont formés de mélanges isomorphes.	Fusibilité Micrographie	
		H. — ALLIAGES DE NICKEL		
Nickel-cuivre		N'ont pas encore été assez étudiés. Forment plusieurs solutions solides.	Micrographie Fusibilité	
Nickel-étain	0 < Sn < 0,1 0,1 < Sn < 45 45 < Sn < 70 70 < Sn < 100	Ni + eutectique Ni — $Ni^{2}Sn$ $Ni^{2}Sn$ + » Ni — $Ni^{2}Sn$ $Ni^{2}Sn$ + » $Ni^{2}Sn$ — Sn Sn + » $Ni^{2}Sn$ — Sn	Fusibilité Micrographie	Il existe probablement des solutions solides. Ces alliages demandent une étude plus approfondie.

DÉSIGNATION	COMPOSITION	CONSTITUTION	MÉTHODES UTILISÉES	OBSERVATIONS
		I. — ALLIAGES D'ALUMINIUM		
Aluminium-fer	0 < Fe < 40,9 40,9 < Fe < 58,0 58,0 < Fe	Sol. Al-Fe et cristaux $FeAl^3$ Constitution encore mal déterminée Sol. FeAl et cristaux Fe^2Al^3	Courbe de fusibilité Micrographie Étude chimique	Il peut exister la combinaison FeAl.
Aluminium-étain	0 < Sn < 79 79 < Sn < 82 82 < Sn < 100	Al + eutectique Al-AlSn AlSn + » Al-AlSn Solution Sn-Al	Fusibilité Micrographie Étude chimique	D'autre part, nous avons pu isoler le composé Al^4Sn par aluminothermie. Mais nous ne l'avons pas retrouvé dans les alliages préparés par fusion. Un doute plane donc sur la constitution de ces alliages.
Aluminium-zinc	0 < Zn < 50 50 < Zn < 5 5 < Zn < 4 4 < Zn < 0	1re solution solide 1re solution solide + eutectique 2e solution solide + eutectique 2e solution solide	Courbe de fusibilité Points de transformation Micrographie	Voir l'*Appendice*.
Aluminium-antimoine	0 < Sb < 32 Sb = 32 Sb = 81 81 < Sb < 100	Solution Al-Sb Combinaison $SbAl^{10}$ Combinaison SbAl Solution Sb-Al	Micrographie Étude chimique	Il ne semble pas y avoir d'eutectique $SbAl\text{-}SbAl^{10}$.
Aluminium-nickel	0 < Ni < 30 30 < Ni < 80 80 < Ni < 90 90 < Ni < 100	$NiAl^6$ en eutectique ou libre Alliages tombant en poussière Cristaux de Ni^2Al Solution Ni-Al	Micrographie Étude chimique	Nous n'avons pas déterminé l'eutectique. On voit encore l'incertitude qui règne sur ces alliages.
Aluminium-argent	0 < Ag < 70 70 < Ag < 75 75 < Ag < 90 90 < Ag < 100	Al + eutectique $Al\text{-}Ag^4Al^3$ Ag^4Al^3 + eutectique $Al\text{-}Ag^4Al^3$ Ag^4Al^3 + » $Ag^4Al^3\text{-}Ag$ Ag + eutectique $Ag^4Al^3\text{-}Ag$		

Pour les alliages plus complexes d'aluminium, se reporter au chapitre XXII.

		J. — ALLIAGES DE MAGNESIUM		
Magnésium-cuivre	0 < Cu < 30 30 < Cu < 56,7 56,7 < Cu < 70 70 < Cu < 72,4 73,4 < Cu < 75 75 < Cu < 84 90 < Cu < 84 90 < Cu	Mg + eutectique Mg — $CuMg^2$ $CuMg^2$ + » Mg — $CuMg^3$ $CuMg^2$ + » $CuMg^3$ — CuMg CuMg + » $CuMg^3$ — CuMg CuMg + » CuMg — Cu^2Mg Cu^2Mg + » CuMg — Cu^2Mg Cu^2Mg + » Cu^2Mg — Cu Cu + » Cu — Cu^2Mg	Fusibilité Micrographie	
Magnésium-aluminium	0 < Al < 20 20 < Al < 36 36 < Al < 40 40 < Al < 52,9 52,9 < Al < 70 70 < Al	Mg + eutectique Mg — $AlMg^2$ $AlMg^2$ + » Mg — $AlMg^2$ $AlMg^2$ + » $AlMg^2AlMg$ AlMg + » $AlMg^2AlMg$ AlMg + » AlMg — Al Al + » AlMg — Al	Fusibilité Micrographie	
Magnésium-cadmium	0 < Cd < 15,0 15 < Cd < 50 58 < Cd < 53 53 < Cd < 75 75 < Cd < 85 85 < Cd	Solution solide Cd — Mg $CdMg^{30}$ + eutectique $CdMg^{30}$ — $CdMg^4$ $CdMg^4$ + » $CdMg^4$ — CdMg $CdMg^4$ + » $CdMg^4$ — CdMg CdMg + » $CdMg^4$ — CdMg Solution solide Mg — Cd	Fusibilité Micrographie	
Magnésium-zinc		Il existe les deux combinaisons Zn^3Mg et $ZnMg^4$	» »	
		K. — ALLIAGES D'ARGENT		
Argent-cuivre	0 < Cu < 40 40 < Cu < 100	Ag + eutectique Ag — Cu Cu + eutectique Ag — Cu	Micrographie Fusibilité	
Argent-étain	0 < Sn < 95 0/0 95 < Sn < 100 0/0	Combinaison probablement isomorphe avec l'argent et de formule Ag^2Sn. Sn + eutectique (?) L'étude des autres alliages d'argent n'est pas assez précisée.		Il est à noter cependant que M. Hershckowitch a mis en vue le composé Ag^4Sn par la force électromotrice de dissolution.
		L. — ALLIAGES D'OR		
Argent-or		Ces alliages sont formés de mélanges isomorphes.	Fusibilité Micrographie	
Or-cuivre		Insuffisament étudiés		

II. — PROPRIÉTÉS ET EMPLOIS DES

DÉSIGNATION	COMPOSITION	PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES
		A. — ALLIA
		1° ALLIAGES DE FER ET DE
Aciers extra-doux	C = 0,060 à 0,150 0/0 environ	R = 34 à 40 E = 20 à 24 A 0/0 = 32 à 28
Aciers doux	C = 0,150 à 0,250 0/0 »	R = 40 à 46 E = 24 à 28 A 0/0 = 28 à 25
Aciers demi-doux	C = 0,250 à 0,375 0/0 »	R = 46 à 55 E = 28 à 32 A 0/0 = 25 à 22
Aciers demi-durs	C = 0,375 à 0,500 0/0 »	R = 55 à 65 E = 32 à 38 A 0/0 = 22 à 18
Aciers durs	C = 0,500 à 0,600 0/0 »	R = 65 à 75 E = 38 à 45 A 0/0 = 18 à 14
Aciers très durs	C = 0,600 à 0,700 0/0 »	R = 75 à 85 E = 45 à 50 A 0/0 = 14 à 8
Aciers extra-durs	C > 0,700	R = 85 à 100 E = 50 à 55 A 0/0 = 8 à 5
		2° — ACIERS SPÉCIAUX. — PRIN
Aciers au nickel	C = 0,040 à 0,150 Ni = 2 à 3	R = 38 à 42 E = 24 à 28 A 0/0 = 30 à 43
	C = 0,300 à 0,450 Ni = 1 à 2,50	R = 50 à 60 E = 30 à 38 A 0/0 = 19 à 25
	C = 0,040 à 0,120 Ni = 5 à 6	R = 44 à 50 E = 30 à 35 A 0/0 = 26 à 30
	C = 0,200 à 0,400 Ni = 5 à 6	R = 60 E = 45 A 0/0 = 20
	C = 0,040 à 0,120 Ni = 7 à 8	R = 52 E = 45 A 0/0 = 27
	C = 0,350 à 0,400 Ni = 12	R = 130 à 140 E = 68 à 75 A 0/0 = 5 à 8
	C = 0,200 à 0,300 Ni = 30	R = 60 à 65 E = 30 à 40 A 0/0 = 32 à 40
	C = 0,200 Ni = 36	R = 70 E = 55 A 0/0 = 25
	C = 0,150 Ni = 46	R = 70 E = 55 A 0/0 = 22
Acier au manganèse	C = 1 0/0 envir. Mn = 13	R = 95 E = 35 A 0/0 = 45
Aciers au chrome	C = 0,650 à 0,750 Cr = 2 C = 1 à 1,250 Cr = 2,5 C = 1,500 à 1,700 Cr = 2,75 à 3	
Aciers au tungstène	C = 0,470 W = 0,600 C = 0,7 à 1,2 W = 2 à 3	R = 80 E = 60 A 0/0 = 14
Aciers au silicium	C = 0,550 à 0,650 Si = 1,3 à 1,2 C = 0,650 à 0,750 Si = 0,900 à 0,800	R = 75 à 85 E = 46 à 50 A 0/0 = 14 à 18 R = 65 à 80 E = 43 à 47 A 0/0 = 12 à 15
Ac. à l'aluminium	C = 0,07 Al = 2,75 C = 0,07 à 0,100 Al = 1,5 à 3	R = 37 à 42 E = 22 à 26 A 0/0 = 30 à 24
Ac. nickel-chrome	C = 0,240 Ni = 1,70 Cr = 0,20 C = 0,300 Ni = 2,50 Cr = 0,80 C = 0,330 Ni = 2,54 Cr = 0,50 C = 0,430 Ni = 2,200 Cr = 0,62 C = 0,800 Ni = 2 Cr = 2	R = 75 E = 60 A 0/0 = 13 R = 66 E = 50 A 0/0 = 18 R = 74 E = 54 A 0/0 = 16,5 R = 82 E = 65 A 0/0 = 15
	C = 0,250-0,450 Ni = 2,5 à 2,8 Cr = 0,275 à 0,500	R = 55 à 75 E = 35 à 50 A 0/0 = 15 à 25
	C = 0,250-0,450 Ni = 5 à 6 Cr = 0,5 à 1 0/0	R = 65 à 85 E = 35 à 75 A 0/0 = 25 à 30
	C = 0,350 Ni = 12 Cr = 0,80	R = 130 E = 85 A 0/0 = 10
	C = 0,550-0,750 Ni = 21 à 23 Cr = 2,50	R = 70 à 90 E = 40 à 55 A 0/0 = 35 à 50

PRINCIPAUX ALLIAGES INDUSTRIELS

CONSTITUTION	EMPLOIS	OBSERVATIONS
GES DE FER		
CARBONE. — ACIERS ORDINAIRES		
Perlite et ferrite	Tôles de chaudières, pièces de cémentation, de forge, rivets, clous, etc.	Voir pour les fers chap. III.
id.	Acier de construction, profilés, fers à planchers, tôles, etc.	La perlite augmente avec la teneur en carbone.
id.	Pièces de forges, de machines : arbres, tiges de piston, essieux, pièces en acier moulé.	
id.	Essieux, arbres de transmission, tiges de piston, barres à mines, pièces en acier moulé.	
id.	Ressorts, rails, pièces d'armes, limes, outils divers, pièces en acier moulé.	
id.	Ressorts de très grande résistance, outils, fraises, limes, coutellerie fine.	
C < 0,850 Perlite + cémentite C > 0,850 id.	Outils.	Ces aciers renferment jusqu'à 1,3 C 0/0.
CIPAUX TYPES INDUSTRIELS		
Perlite et ferrite	Pièces cémentées, trempées, tubes sans soudures.	
id.	Métal à canons, tôles, rivets, embouis, etc.	On emploie aussi des aciers à Ni = 3 à 4.
id.	Pièces cémentées-trempées.	
id.	Pièces mécaniques : arbres, tiges de pistons, fusées, essieux, etc.	
id.	Pièces cémentées non trempées.	Voir le texte chap. IV. *Aciers au nickel.*
Martensite	Utilisé pour les arbres ou pour les pièces qui craignent le matage.	
Fer γ	Soupapes d'automobiles, tubes sans soudure.	
Fer γ	Géodésie, horlogerie.	
Fer γ	Remplace le platine dans les lampes à incandescence.	
Fer γ	Pièces qui doivent subir des chocs importants (pointes d'aiguilles, concasseurs).	Acier de M. Hadfield. Les propriétés sont données après trempe à l'eau à 900°.
Perlite et ferrite	Acier dur pour outils.	
Perlite + carbure double	Acier très dur pour outils.	
id.	Acier extra-dur pour outils.	
Perlite	Ressorts.	
Perlite et carbure	Acier à outils.	
Perlite et ferrite		
id.	Acier à ressorts.	
id.	Acier pour tôles dynamos.	
id.	id.	
Perlite et ferrite		Tous ces aciers sont du type : C = 0,250-0,450 Ni = 2 à 2,5 Cr = 0,2 à 0,8
id.		
id.	Plaques de blindage.	
id.		
id.	Projectiles de rupture.	
id.	Pièces mécaniques : arbres, manivelles, engrenages, tiges de pistons.	
Sur la limite de la martensite	Pièces mécaniques : arbres, manivelles, engrenages, tiges de pistons.	Peu usité, trop dur et fragile.
Martensite	Pièces mécaniques : arbres, manivelles, engrenages, tiges de pistons.	
Fer γ	Pièces devant résister au choc et à l'usure.	

DÉSIGNATION	COMPOSITION	PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES
Aciers chrome-tungstène	C = 0,200-0,700 W = 9 à 18 0/0 Cr = 2 à 8	
Aciers manganèse-silicium	Semblables aux aciers au silicium.	

3° ALLIAGES UTILISÉS

Ferro-manganèse	Mn < 25 0/0 (spiegels) Mn > 25 0/0	
Ferro-silicium	Si varie de 12 à 98 0/0	
Silico-spiegel I	Mn = 20 environ Si = 10 à 12 environ	
id. II	Mn = 75 — Si = 20	
Ferro-chromes	Cr = 30 à 99 C = 0,2 à 9 0/0	
Ferro-tungstènes	W = 64 à 80 C = 1,5 environ	
Ferro-molybdènes	Mo = 52 à 85 C = 0,3 à 3 0/0	
Ferrotitanes	Ti = 50 à 60 C = 0,3 à 3,5 0/0	

B. — ALLIAGES

4° BRONZES

Bronzes ordinaires	Cu = 95 Sn = 5 Cu = 90 Sn = 10	R = 20 E = 10 A 0/0 = 38 R = 27 E = 11 A 0/0 = 26
	Cu = 87 Sn = 13 Cu = 84 Sn = 16 Cu = 82 Sn = 18 Cu = 75 à 80 Sn = 25 à 20	R = 24 E = 14 A 0/0 = 3 R = 25,0 E = 18 A 0/0 = 2 R = 25 E = 25 A 0/0 = 0
	Cu = 65 à 70 Sn = 35 à 30 Cu = 78 à 90 Sn = 2 à 4 Zn = 10 à 18	

5° BRONZES

Bronze au plomb	Cu = 84 Pb = 8 Sn = 8 Cu = 77 Pb = 15 Sn = 8	
Bronze plomb-nickel	Cu = 64 Pb = 30 Sn = 4 Ni = 1	
Bronzes phosphoreux	Cu = 89 Sn = 9 Zn = 1,5 Pb = 0,5 Ph = traces	R = 32 E = 16 A 0/0 = 41
id.	Cu = 82 à 85 Sn = 15 à 18 Ph = traces	
Bronzes mangano-phosphoreux	Cu = 92 Sn = 8 Mn = 0,50 Ph = traces Zn = 3	R = 26 E = 13 A 0/0 = 40
Bronze au silicium	Cu = 89 Sn = 9 Zn = 1,5 Pb = 0,5 Si = 3	R = 27 E = 16 A 0/0 = 20
Bronze à l'aluminium	Cu = 89 Sn = 9 Zn = 1,5 Pb = 0,5 Al = 3	R = 31 E = 15 A 0/0 = 43

CONSTITUTION	EMPLOIS	OBSERVATIONS
Carbure double ou triple	Aciers à coupe rapide.	On notera combien la composition est variable. Parfois on trouve Mo=1 à 2 0/0. Voir *Aciers au silicium.*

EN SIDÉRURGIE

CONSTITUTION	EMPLOIS	OBSERVATIONS
Voir pour la constitution le texte, chapitre V	Utilisés dans la fabrication des aciers ordinaires comme addition finale et pour les moulages.	La teneur en carbone varie beaucoup et dépend notamment de la teneur en Si.
	Utilisé pour la fabrication des aciers comme addition finale et pour les moulages.	
	Utilisé surtout dans le moulage des aciers.	
	Sert dans la fabrication des aciers au Cr, Cr-Ni, Cr-W.	
	id. au W, Cr-W.	
	id. au Mo, Cr-W-Mo, etc.	
	Commence à être utilisé pour améliorer les fontes et les moulages d'acier.	

DE CUIVRE

ORDINAIRES

CONSTITUTION	EMPLOIS	OBSERVATIONS
Sol. α	Pièces à décolleter, barres laminées, étirées fils.	Les types de bronzes sont tellement nombreux que nous ne pouvons indiquer que les plus importants.
Sol. α + Sol. δ	Pièces mécaniques soumises à des chocs (engrenages) ancien bronze à canons.	
id.	Robinetterie et diverses pièces mécaniques.	
id.	Pièces à frottement (alternatif).	
id.	— — (circulaire).	
id.	Bronzes à cloches.	
Sn < 32 sol. α + Cu^4Sn	Anciens bronzes à miroirs.	
Sn > 32 Cu^4Sn + Cu^3Sn	Bronzes statues.	

SPÉCIAUX

CONSTITUTION	EMPLOIS	OBSERVATIONS
Le plomb se trouve réparti dans la masse	Bronze à frottement doux.	La teneur en zinc est extrêmement variable, même dans les bronzes mécaniques.
id.	— — —	
id.	Alliage tenant le milieu entre les bronzes de frottement et les antifrictions.	
Insuffisamment étudiée	Pour pièces mécaniques soumises à des chocs (engrenages).	
id.	Pour coussinets.	Voir chapitre VII.
id.	Pour pièces mécaniques soumises à des efforts autres que le frottement.	
id.	id.	

DÉSIGNATION	COMPOSITION	PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES
		6° ALLIAGES DE CUIVRE ET DE
Laitons	Cu = 95 Zn = 5	R = 23 A 0/0 = 34
	Cu = 90 Zn = 10	R = 24 A 0/0 = 37
	Cu = 85 Zn = 15	R = 26 A 0/0 = 41
	Cu = 80 Zn = 20	R = 27 A 0/0 = 46
	Cu = 70 Zn = 30	R = 26 A 0/0 = 58
	Cu = 67 Zn = 33	R = 28 A 0/0 = 55
	Cu = 62 Zn = 38	R = 33 A 0/0 = 40
	Cu = 60 Zn = 40	R = 36 A 0/0 = 34
	Cu = 55 Zn = 45	R = 47 A 0/0 = 17
		7° LAITONS
Ces métaux sont vendus sous le nom de bronzes malléables de haute résistance.	Cu = 57 à 62 Mn = 0,2 à 35 0/0 Fe = 1 0/0 env. Sn = 1 à 2,5 Al = 0,2 à 4 0/0 Z = le complém. Parfois traces de phosphore	Pièces moulées : R = 35 à 40 E = 15 à 20 A 0/0 = 15 à 25 Barres étirées : R = 40 à 50 E = 20 à 30 A 0/0 = 15 à 25 Pièces forgées : R = 40 à 45 E = 20 à 25 A 0/0 = 20 à 30 Tôles laminées : R = 38 à 45 E = 15 à 20 A 0/0 = 18 à 25 Fils fins : R = jusqu'à 105 E = 85 A 0/0 = ?
		9° AUTRES ALLI
Cuivre manganésé	Cu = 97 Mn = 3	R = 22 A 0/0 = 45 Choc (Mouton Frémont) = 33
	Cu = 95,5 Mn = 4,5	R = 24 A 0/0 = 42 Choc id. = 34
	Cu = 70 Mn = 30	
Cuivre-phosphore	Cu = 90 Ph = 10	
	Cu = 85 Ph = 15	
Cuivre-silicium	Si = 10, 15, 20 ou 50 0/0 (cupro-silicium)	Différentes avec les teneurs
	Cu = 96,5 à 99,98 Si = 3,50 à 0,02	R = 45 à 95 Conductibilité = 70 à 98 (celle de Cu = 100)
		C. — ALLIAGES
Étain-zinc	Sn = 50 Zn = 50	
Étain-plomb	Sn = 82 Pb = 18	
	Sn = 60 Pb = 40	
	Sn = 45 Pb = 55	
	Sn = 40 Pb = 60	
	Sn = 66 Pb = 34	
Étain-antimoine	Sn = 80 Sb = 20	
	Sn = 91 Sb = 9	
	Sn = 80 Sb = 20	
	Sn = 86 Sb = 14	
	Sn = 80 Sb = 20	
Étain-bismuth	Sn = 80 Bi = 20	
	Sn = 45 Bi = 55	

CONSTITUTION	EMPLOIS	OBSERVATIONS
ZINC : LAITONS ORDINAIRES		
	Alliages pour la fausse bijouterie.	Toutes les propriétés mécaniques données dans ce tableau ont trait à des barres laminées étirées et recuites. Il est bien à noter que ces produits sont généralement consommés dans un certain état d'écrouissage.
	Alliages pour la fausse bijouterie, laiton brasable des Compagnies des chemins de fer.	
	Alliage pour dorures, tombac.	
Solution α	Autre alliage pour dorure et fausse bijouterie.	
	Laitons pour planches, clinquant, tubes, fils, etc.	
	Laitons dits 1er titre : Planches, décolletage, laitons de cartouche (France). Pièces d'estampage, laiton soudable, pièces fondues, tubes.	
Solution α + sol. β	Laiton dit titre mixte. Décolletage, pièces fondues.	
Sol. α + sol. β ou ZnCu	Laiton dit 2e titre (décolletage ordinaire) alliages de Muntz.	
id.	Est utilisé ordinairement avec du plomb.	Limite des laitons industriels.
SPÉCIAUX		
	Hélices, étambots, tubes lance-torpille.	
	Boulons, arbres, etc.	
Se reporter au chapitre x	Arbres, tiges de pistons, frettes, etc.	Voir l'*Appendice*.
	Constructions maritimes, plaques de condenseur.	
AGES DE CUIVRE		
Solution solide CuMn	Tubes, plaques, etc.	Ces résultats s'entendent sur barres étirées et *recuites*.
id.	Barres pour entretoises de foyers de locomotives.	
id.	Utilisé pour introduire le manganèse.	
PCu^3 + eutectique PCu^3	Utilisé en fonderie de cuivre pour introduire le phosphore.	
PCu^3	Utilisé en fonderie de cuivre pour introduire le phosphore.	
Solution Cu-Si (Si < 7) Eutectique sol.-$CuSi^2$ (Si = 15) $CuSi^2$ + eutectique (Si > 15)	Utilisé en fonderie de cuivre pour introduire le silicium.	
Solution cuivre-silicium	Utilisé pour fils électriques.	
D'ÉTAIN		
Sn libre + eutectique PbSn	Alliages pour modèles de fonderie.	
Pb libre + eutectique PbSn	Alliages pour potin.	
id.	Alliages pour joaillerie commune, articles de Paris, jouets.	
id.	Alliages pour soudures des ferblantiers.	
id.	Alliages pour soudures des zingueurs.	
Sn libre + eutectique SnPb	Soudures pour bronzes siliceux.	
SbSn + eutectique	Alliages pour poterie d'étain.	
Solution solide (?)	Métal anglais type (Voir analyse chap. XIII).	Généralement il renferme : Cu = 1 à 3 0/0
SbSn + eutectique	Alliages pour coussinets, pour robinetterie.	
id.	Alliages pour robinetterie.	
id.	Alliages pour planches à graver.	
Sn libre + eutectique SnBi	Alliages fusibles.	
Eutectique SnBi	id.	

DÉSIGNATION	COMPOSITION	CONSTITUTION	EMPLOIS	OBSERVATIONS
		D. — ALLIAGES DE PLOMB		
Plomb-antimoine	Pb = 75 à 90 Sb = 25 à 10	Sb libre + eutectique PbSb	Caractères d'imprimerie.	Souvent on ajoute Sn, Zn, Bi.
	Pb = 67 Sb = 33	id.	Employé pour la construction des instruments de musique.	
	Pb = 95 à 94 Sb = 5 à 6	Pb libre + eutectique PbSb	Plaques d'accumulateurs balles durcies.	
	Pb = 83 à 94 Sb = 17 à 6	Jusqu'à 13 0/0; Pb, libre au-delà Sb libre	Coussinets employés surtout pour les transmissions.	
Plomb et Arsenic	Pb = 99,100 As = 0,900	Non étudiée	Alliage pour plomb de chasse (France).	
	Pb = 99,200 As = 0,300		Alliage pour plomb de chasse (Angleterre).	Sa dureté augmente avec As.
		E. — ALLIAGES DE CADMIUM		
		Aucun n'est utilisé dans l'industrie		
		F. — ALLIAGES DE ZINC		
		Voir plus haut les alliages de Zn déjà cités		
		G. — ALLIAGES D'ANTIMOINE		
		Voir plus haut les alliages de Sb déjà cités		
		H. — ALLIAGES DE NICKEL		
Nickel-cuivre	Ni = 12 Cu = 88	Solution solide NiCu	Pièces de décolletage. Monnaies États-Unis.	
	Ni = 20 Cu = 80	id.	Anciennes enveloppes de balles.	
	Ni = 25 Cu = 75	id.	Réflecteurs. Monnaies.	
		I. — ALLIAGES D'ALUMINIUM		
Alum.-étain	Al Sn	Solution solide AlSn	Employé comme carters d'automobiles.	
Alum.-nickel	Al = 95 à 98 Ni = 2 à 5 0/0	Al + eutectique Al — Al^6Ni	Alliages pour modelage décolletage.	
Alum.-fer	Al = 20 Fe = 80 0/0	Voir le texte chapitre XXII	Utilisés en sidérurgie.	
Alum.-zinc	Al = 5 Zn = 95		Utilisé dans la construction des graphophones.	
		J. — ALLIAGES DE MAGNÉSIUM		
Aluminium-manganèse	Al = 90 Mg = 10	Al + eutectique Al — AlMg	Carters d'automobiles	
		K. — ALLIAGES DE MERCURE ; AMALGAMES		
Mercure-cuivre	Hg = 70 Cu = 30		Mastic.	
Mercure-bismuth	Hg = 80 Bi = 20		Utilisé dans l'étamage du verre.	
Mercure-or	Hg 33,33 Au = 66,66		Anciennement employé pour la dorure au mercure.	

DÉSIGNATION	COMPOSITION		EMPLOIS
	L. — ALLIAGES D'ARGENT		
Argent-cuivre	Ag = 83,5	Cu = 16,5	Alliages de monnaies.
	Ag = 90	Cu = 10	id. (pièces de 5 francs françaises).
	Ag = 95	Cu = 5	Alliages de monnaies pour vaisselles (1er titre français).
	Ag = 80	Cu = 20	Alliages de 2e titre.
	M. — ALLIAGES D'OR		
Or-argent	Au = 70 à 73	Ag = 30 à 27	Joaillerie.
Or-cuivre	Au = 75 à 92	Cu = 25 à 8	id.
	Au = 583	Cu = 417	id.
	Au = 900	Cu = 100	Monnaies (France, Autriche, Allemagne, etc.).
	Au = 916,66	Cu = 93,33	Monnaies (Angleterre, Portugal, Turquie, Brésil).
	Au = 875	Cu = 125	Monnaies (Égypte, Mexique).
	Au = 982	Cu = 118	Monnaies (Hollande).
	N. — ALLIAGES DE PLATINE		
Platine-cuivre	Cu = 18,75	Pt = 81,25	Or de Cooper.
	Ag = 83 à 65	Pt = 17 à 35	Alliages pour dentistes.
	Ag = 66,7	Pt = 33,3	Etalon de résistance électrique.
	Au = 95	Pt = 5	Alliages pour dentistes.
	Pt = 90	Ir = 10	Fils pour thermo-couples, étalons.
	Pt = 90	Rh = 10	id.
	O. — ALLIAGES DE MANGANÈSE *Autres que ceux déjà étudiés*		
Aluminium-manganèse	Mn = 0,5 à 2		Utilisés comme alliages légers d'aluminium (carters, tôles, etc.) R = 15 à 17 : A 0/0 = 4 à 8 (coulé).

APPENDICE

Les recherches sur les alliages métalliques ont été extrêmement importantes durant ces derniers mois ; certains des résultats obtenus sont d'une portée telle que nous avons cru devoir les réunir dans un *Appendice*, auquel nous n'avons pu donner toute l'ampleur qui eût été nécessaire.

Nous lui avons gardé la classification du livre.

APPENDICE AU CHAPITRE III

ALLIAGES DE FER ET DE CARBONE

Au meeting de septembre 1905 de l' « Iron and Steel Institute », M. Bénédicks a présenté quelques remarques importantes sur la nature de la troostite[1]. Ses principales conclusions sont les suivantes :

1° M. Osmond a très correctement défini la troostite, en disant qu'elle est une forme intermédiaire entre la martensite et la perlite;

2° Il y a transition continue entre la troostite et la perlite ; on est amené naturellement à la conclusion que la troostite est une perlite avec de petites particules ultra-microscopiques de cémentite, et renfermant aussi plus ou moins de carbone de trempe. Cette hypothèse est la plus simple et la plus naturelle à adopter, tant qu'il n'est pas démontré qu'elle est contraire à la réalité. Ceci est d'accord avec le

1. Ces remarques sont tout à fait concordantes avec les faits très intéressants notés par M. Grenet et publiés dans la *Revue de Métallurgie* (1905, p. 353).

fait de l'extrême facilité avec laquelle la troostite est affectée par les réactifs, avec sa dureté variable qui se trouve entre celle de la martensite et celle de la perlite et avec le fait que la troostite avec un acier riche en carbone, donne de la cémentite quand on chauffe légèrement, comme l'a montré Kourbatoff.

Suivant toute probabilité, la troostite se forme par une transformation *in situ* de la martensite, ce qui explique que le carbone qu'il contient doit être le même que celui de la martensite dont il provient. L'hypothèse émise par Boynton (*Journal of the Iron and Steel Institute*, 1904, n° 1, p. 262) que la troostite est du fer pur ne s'appuie ni sur l'expérience, ni sur la théorie. M. Bénédicks ajoute que la théorie suggérée par M. Kourbatoff que la troostite est une solution de carbone élémentaire dans le fer n'est pas soutenable.

La troostite est tirée de la martensite en abaissant considérablement l'intensité de la trempe, notamment aux endroits qui sont en contact avec la ferrite ou la cémentite ; ceci est en parfaite harmonie avec les exigences de la théorie.

La troostite paraît offrir, dans le domaine des alliages, une curieuse analogie avec les solutions colloïdales.

Ajoutons, d'ailleurs, que des recherches générales et internationales sont entreprises pour mieux définir les constituants suivants des alliages fer-carbone : martensite, troostite, sorbite, austenite.

Voici, d'ailleurs, comment s'exprime à ce sujet M. Henry Le Chatelier dans la *Revue de Métallurgie* de mai 1905 :

« On a pendant longtemps fabriqué de l'acier sans savoir en faire l'analyse chimique. Aujourd'hui aucune aciérie ne peut se dispenser de déterminer la composition élémentaire de ses produits. On se passe encore de connaître d'une façon précise la nature des constituants des aciers, mais leur détermination, quand elle sera possible, deviendra d'une nécessité aussi absolue dans la fabrication que l'est actuellement l'analyse chimique.

« M. Glazebrook, directeur du « National Physical Laboratory », à Londres, et M. H. Le Chatelier, président de la Société d'Encouragement pour l'Industrie nationale, à Paris, ont pris l'initiative de provoquer l'organisation d'une Commission internationale en vue d'entreprendre sur cette importante question des recherches contradictoires ayant pour objet de mieux préciser la nature des différents constituants des aciers et de définir ensuite d'un commun accord leurs caractères essentiels avec leur nomenclature.

« Un certain nombre de savants et de métallurgistes ont répondu de différents pays à l'appel qui leur a été adressé, et la Commission

d'étude des Constituants des Aciers est actuellement composée comme suit :

Amérique : MM. Howe et Sauveur;

Angleterre : MM. Arnold, Hadfield, Stead et Glazebrook ;

France : MM. Charpy, Pérot et H. Le Chatelier ;

Allemagne : M. Martens;

Suède : MM. Brinell et Dillner;

Russie : M. Kournakow.

« La difficulté de l'étude des constituants des aciers peut être rapportée à trois causes :

« 1° Le fer existe sous de nombreux états allotropiques dont l'influence se fait également sentir sur ses solutions mutuelles avec le carbone. Les différents états magnétiques donnent lieu en plus à des difficultés spéciales; ils semblent obéir à des lois tout autres que celles des états allotropiques ordinaires.

« Tandis que les transformations mutuelles de ceux-ci se font d'une façon brusque, les changements magnétiques sont au contraire progressifs, comme si les deux variétés correspondantes du métal étaient solubles l'une dans l'autre ;

« 2° La finesse extrême des éléments constitutifs des aciers, en particulier des métaux trempés et recuits, les plus intéressants de tous, rend leur étude microscopique difficile, parfois même impossible. Les plus forts grossissements ne permettent pas de résoudre certains agrégats complexes, car on ne peut séparer optiquement deux points voisins dont la distance est inférieure à une certaine fraction de la longueur d'onde ;

« 3° Les propriétés des différentes solutions solides constituant les aciers trempés sont si voisines qu'il est impossible d'arriver à les séparer par des méthodes purement chimiques, comme on le fait pour la ferrite, le graphite et la cémentite.

. . . .

« Dans les constituants des aciers, il y a trois ordres de faits essentiellement tranchés que l'on confond un peu aujourd'hui et dont la distinction devra être l'objet essentiel des études projetées :

« 1° Certains constituants des aciers sont des corps homogènes, corps simples, composés définis, solutions solides, ce que l'on appelle aujourd'hui, d'après Gibbs, des *phases*. La ferrite, la cémentite, le graphite rentrent certainement dans cette catégorie, sans doute aussi certains des constituants des aciers trempés découverts par M. Osmond et connus sous le nom de martensite, troostite, austenite ;

« 2° D'autres constituants sont des agrégats, tels la perlite, les aciers eutectoïdes, les fontes eutectiques, sans doute aussi certaines sorbites. Ils sont formés par la juxtaposition de phases différentes, ferrite et cémentite dans la perlite ordinaire, peut-être aussi par la juxtaposition de certaines solutions solides différentes de carbone, analogues à ce que serait une émulsion des deux solutions non miscibles d'eau et d'éther. Dans les aciers chauffés à haute température et refroidis lentement dont la structure est très grossière, le microscope permet sans difficulté de caractériser ces agrégats. Il n'en est plus de même pour les aciers refroidis rapidement sans être pourtant véritablement trempés. L'incertitude est alors absolue;

« 3° La structure des agrégats d'une composition déterminée peut varier dans des limites infinies, comme dimensions ou comme forme, et elle exerce une influence considérable sur les propriétés mécaniques des aciers. La perlite lamellaire, la perlite granulaire, certaines sorbites ne semblent être que des structures différentes d'un même agrégat, et cependant leur présence communique au métal des qualités toutes différentes. »

Suit l'exposé du programme des recherches.

APPENDICE AU CHAPITRE IV

ACIERS SPÉCIAUX

Nous venons de terminer quelques séries de recherches sur les aciers spéciaux quaternaires : nous en donnerons un résumé succinct :

1° Acier nickel-manganèse. — Nous avons déjà indiqué quelques résultats obtenus sur les aciers nickel-manganèse (Voir p. 395); pour plus de détails, nous renverrons au mémoire que nous avons publié sur ce sujet dans la *Revue de Métallurgie* de novembre 1905.

2° Aciers nickel-vanadium. — Les recherches que nous avons effectuées sur les aciers nickel-vanadium et qui ont fait partie de notre communication sur *le Vanadium et son emploi en métallurgie* au meeting de septembre 1905 de l'« Iron and Steel Institute », nous ont conduit aux résultats suivants :

Les aciers nickel-vanadium se divisent en six classes, à savoir :

1° Aciers perlitiques ;

2° Aciers à carbure et ferrite ;

3° Aciers martensitiques ;

4° Aciers à martensite et à carbure ;

5° Aciers à fer γ ;

6° Aciers à fer γ et à carbure.

Il semble que le vanadium abaisse légèrement les points de passage d'un groupe à l'autre des aciers au nickel.

Les essais mécaniques montrent que sur aciers recuits :

1° Pour les aciers perlitiques, en maintenant le nickel et le carbone constants et en augmentant peu à peu la teneur en vanadium, on augmente la charge de rupture, tant que le vanadium ne dépasse pas 1 0/0.

Pour des teneurs plus élevées, la charge de rupture décroît.

Il y a là un point de ressemblance très net avec les aciers au vanadium. Dès qu'apparaît le carbure, la résistance au choc diminue ;

2° Les aciers martensitiques subissent également l'influence du vanadium qui augmente la charge de rupture sans accroître la fragilité. Il est à noter que même les aciers martensitiques qui renferment un peu de carbure ne sont pas extrêmement fragiles ; dans ces derniers, la dureté n'est pas très élevée, sans doute parce que

la formation de carbure de vanadium a localisé le carbone, qui n'est plus en solution dans toute la masse;

3° Les aciers à fer γ ne voient pas leurs charges de rupture modifiées par l'addition de vanadium ; la limite élastique est nettement surélevée, tant qu'il n'y a pas trop de carbure, mais les allongements et la résistance au choc sont diminués, surtout les premiers.

Il est intéressant de noter que, dans toutes les classes d'aciers, le maximum d'influence du vanadium sur la charge de rupture est obtenu par une teneur de 1 0/0 de vanadium.

L'influence de la trempe sur les aciers nickel-vanadium peut se déduire de ce que nous avons dit à ce sujet pour les aciers au nickel et les aciers au vanadium (Voir p. 290 et p. 352). Les aciers perlitiques deviennent martensitiques ; les aciers martensitiques restent martensitiques avec une tendance au fer γ; les aciers à fer γ restent polyédriques ; les aciers qui renferment du carbure, quels qu'ils soient, perlitiques, martensitiques ou polyédriques, conservent intégralement leur carbure.

Les essais mécaniques sur aciers trempés ont montré que:

1° La trempe à 850° a une influence considérable sur les propriétés des aciers perlitiques ; parfois la charge de rupture et la limite élastique sont plus que doublées, et cela avec des allongements et une résistance au choc très remarquables. C'est ainsi qu'un acier renfermant environ:

C	0,200
Ni	2
Va	0,3

a donné avant trempe:

R	66,3
E	55,2
A 0/0	21,5
Σ	57,2
Choc	31
Dureté	187

après trempe à 850°:

R	117,0
E	97,0
A 0/0	8
Σ	44,3
Choc	11
Dureté	387

Un autre acier renfermant approximativement :

C	0,200
Ni	2
Va	0,7

a donné avant trempe :

R	64,1
E	49,4
A 0/0	23,5
Σ	69,5
Choc	30
Dureté	159

après trempe à 850° :

R	118,3
E	111,6
A 0/0	9
Σ	47,4
Choc	141
Dureté	321

Les aciers dont tout le carbone est à l'état de carbure sont plutôt adoucis.

Les aciers martensitiques sont un peu durcis par trempe.

Pour les aciers à fer γ, un fait intéressant se passe ; la charge de rupture et la limite élastique ne sont pas diminuées, au contraire de ce qui se passe pour les aciers au nickel; la résistance au choc et les allongements sont améliorés.

3° **Aciers nickel-silicium.** — L'étude que nous venons de terminer sur ces aciers nous a conduit aux conclusions suivantes :

I. Ces aciers se divisent, au point de vue micrographique, en six classes :

1° Les aciers perlitiques ;

2° Les aciers qui renferment simultanément de la perlite et du graphite ;

3° Les aciers martensitiques ;

4° Les aciers à martensite et à graphite ;

5° Les aciers à fer γ ;

6° Les aciers à fer γ et à graphite.

Il est fort probable que l'on pourrait trouver des aciers formés de

ferrite et de graphite ; les doses de silicium de nos aciers n'étaient, sans doute, pas assez élevées pour amener ce phénomène.

Ces subdivisions pouvaient se déduire de l'étude que nous avons faite des aciers au nickel et des aciers au silicium.

Il faut noter que, dans les aciers à fer γ, même ceux qui ne renferment pas de graphite, on voit apparaître quelques points blancs qui peuvent être un siliciure ou une solution solide spéciale.

II. L'effet du nickel au point de vue constitution est de s'opposer, surtout dans les aciers perlitiques et les aciers martensitiques, à la précipitation du carbone à l'état de graphite.

La présence du graphite dans un acier nickel-silicium ne dépend pas seulement de la teneur en silicium de cet acier, mais bien aussi de sa teneur en carbone. A même dose de nickel, plus la teneur en carbone est élevée, moins il faut de silicium pour qu'il y ait présence de graphite.

III. Un recuit prolongé à 900 ou 1.000° ne change pas — du moins dans la limite de nos expériences — l'état du carbone contenu dans un acier nickel-silicium, au contraire de ce qui se passe avec des aciers au silicium.

IV. L'étude des propriétés mécaniques des aciers normaux a montré que :

A. Les aciers perlitiques ont une charge de rupture et une limite élastique beaucoup plus élevées que pour les aciers simplement au nickel ; mais les allongements et la résistance au choc sont plus faibles.

B. Les aciers martensitiques ont une très haute charge de rupture et sont très fragiles, surtout dans le sens perpendiculaire à celui du laminage ; mais l'influence du silicium n'a pas pu être nettement définie.

C. Les aciers à fer γ sont plutôt améliorés par addition de silicium, qui élève un peu leur limite élastique.

V. L'étude des propriétés mécaniques des aciers trempés à 800° dans l'eau à + 20° a montré que :

La trempe a une influence considérable sur les propriétés mécaniques des aciers perlitiques ; elle augmente, d'une façon extraordinaire, la charge de rupture et la limite élastique ; mais les aciers perdent tous leurs allongements et deviennent assez fragiles. Il est assez étonnant cependant que ces aciers donnent au choc 5 à 6 kilogrammètres, bien que les allongements soient nuls. Il est vrai que la résistance au choc est nulle dans le sens perpendiculaire au laminage.

La trempe a, sur les aciers martensitiques et sur les aciers à fer γ, le même effet que sur les aciers au nickel de même constitution.

VI. Enfin, dès qu'un acier nickel-silicium martensitique ou à fer γ renferme un peu de graphite ; il n'est plus susceptible d'être forgé. Il n'en est pas de même pour les aciers perlitiques.

Autres recherches récentes sur les aciers spéciaux. — MM. Carpenter et Longmuir étudient actuellement la courbe de récalescence d'alliages fer-nickel préparés par M. Hadfield ; ils ont trouvé une discontinuité très nette lorsqu'on a atteint 4 0/0 de nickel (*Engineering*, LXXIX, 367 ; 1905).

D'autre part, M. Carpenter a fait une étude sur les points de transformation des aciers rapides à outils ; le fait saillant de ces recherches est que, lorsque la température de chauffage passe de 1.030 à 1.070°, l'intervalle des points de transformation au refroidissement et à l'échauffement ainsi que la structure subissent des changements notables que l'on ne trouve pas dans les autres alliages de fer.

Au meeting de septembre 1905, de l' « Iron and Steel Institute », M. Waterhouse, de Buffalo, a publié un mémoire sur *l'Influence du nickel et du carbone sur le fer*. L'auteur s'est appuyé sur le diagramme que nous avons donné d'autre part (Voir p. 278) et en a contrôlé la complète exactitude ; mais il a étudié aussi des produits très carburés. Les conclusions de son mémoire sont les suivantes :

Les constituants des aciers à bas pourcentage de nickel « à l'état non refroidi brusquement » sont ferrite, cémentite et graphite.

La perlite de ces aciers montre une grande aptitude à se liquater en ses constituants : ferrite et cémentite. Dans ces conditions, *la cémentite a pour formule* $FeNi^3C$.

Le rapport eutectoïde dans ces aciers paraît se trouver à environ 0,700 0/0 C ; mais, dans les aciers laminés, il n'y a pas de cémentite libre, tant que le carbone n'atteint pas 1 0/0.

Le nickel abaisse les points de transformation d'environ 20° pour chaque 1 0/0 de nickel.

La cémentite de ces aciers est très susceptible de précipiter son carbone à l'état de graphite de recuit.

Les deux points à retenir de cette étude sont les suivants :

1° Le nickel entrerait dans la cémentite ; ceci est en contradiction absolue avec les recherches faites jusqu'à ce jour sur ce sujet, notamment par MM. Henry Le Chatelier, Carnot et Goutal, etc..., et nous ne pensons pas que les faits apportés par M. Waterhouse soient des preuves suffisantes à l'appui de son assertion ;

2° Il y aurait une différence dans les constituants de certains aciers au nickel (entre 0,700 et 1 0/0 de carbone), suivant qu'ils sont laminés ou bruts de coulée ; ceci paraît étonnant.

APPENDICE AU CHAPITRE V

AUTRES ALLIAGES DE FER

FER ET HYDROGÈNE. — FER ET AZOTE

Depuis fort longtemps on se doutait, sans pouvoir préciser, que les gaz dissous dans le fer et ses alliages avaient une importance très nette sur ses propriétés. Un remarquable mémoire de M. Braune sur *l'Influence de l'azote* a précisé dernièrement certains points et rend brûlante cette question des gaz dissous. Nous rappellerons d'abord sommairement les résultats obtenus par le D[r] Heyn, de Charlottenbourg, sur l'influence de l'hydrogène, et nous résumerons ensuite l'étude de M. Braune sur *l'Influence de l'azote.*

Ughes et Ledebur ont montré que le décapage des aciers fait aux acides amène de la fragilité par l'hydrogène produit et absorbé ; le D[r] Heyn a montré que :

1° L'acier doux chauffé dans l'hydrogène à une température comprise entre 730 et 1.000° et, trempé dans l'eau, devient beaucoup plus fragile que lorsque le chauffage précédant la trempe a eu lieu à l'air. — Le refroidissement lent dans l'hydrogène aussi bien que l'immersion dans l'eau à partir d'une température inférieure à 730° ne produit aucun effet qui puisse être mis en évidence par l'essai de pliage ;

2° L'hydrogène pénètre graduellement depuis la surface jusqu'à l'intérieur des échantillons ;

3° La fragilité de l'acier produite par le chauffage dans l'hydrogène suivi de trempe à l'eau peut être affaiblie ou entièrement supprimée par un chauffage subséquent dans l'air ou l'azote, si l'action de l'hydrogène n'a pas pénétré trop profondément.

Le chauffage, à une température de 200 à 250°, suffit dans le cas des métaux pauvres en carbone pour supprimer complètement l'action de l'hydrogène ; dans le cas des métaux riches en carbone, la fragilité décroît encore par ce traitement, mais on n'arrive pas à adoucir complètement ce métal. Il semble donc que plus le métal est riche en carbone, plus il retient l'hydrogène ; mais, dans tous les cas, le chauffage à l'air au rouge supprime la fragilité ainsi produite.

4° Une exposition prolongée à l'air des échantillons trempés après chauffage dans l'hydrogène diminue à la longue et même parfois arrive à supprimer complètement la fragilité.

5° La microstructure des échantillons d'aciers chauffés dans l'hydrogène et trempés dans l'eau ne montre pas la plus légère différence avec la structure de ceux qui ont été chauffés à l'air et trempés dans l'eau. — On ne peut non plus constater aucune différence dans le poids spécifique.

D'après les expériences très précises du Dr Heyn, il faut admettre que l'hydrogène amenant la fragilité est complètement chassé par un chauffage dans l'azote et que c'est bien lui qui amène la fragilité.

Le professeur Wedding et le Dr Fischer ont publié sur le même sujet, dans le *Stahlund Eisen* (XXIII, 1268, 1903), des résultats intéressants de longues expériences dans le détail desquelles nous ne pouvons entrer.

L'influence de l'azote est non moins intéressante à étudier : à la réunion du Groupe français de l'Association internationale des Méthodes d'essais du 27 mai 1905, M. Braune, ingénieur suédois, travaillant actuellement au laboratoire de M. Henry Le Chatelier, a fait une communication de la plus haute importance et qui peut avoir une répercussion énorme sur l'industrie sidérurgique entière : M. Braune a montré d'une façon aussi précise que scientifique que la cause principale de la fragilité dans les aciers de composition normale résidait dans la présence d'azote qui forme avec le fer un azoture.

Ce composé entre d'abord en solution dans la ferrite ; au fur et à mesure que l'azote augmente, les dimensions des cellules de ferrite diminuent.

Bientôt, l'azote croissant toujours, on voit apparaître autour des cellules de ferrite un joint assez important qui va en augmentant, et on finit par trouver des petits bâtonnets.

Ceci se rapporte aux aciers peu carburés.

Pour les aciers très carburés, la perlite prend, sous l'influence de l'azote, un aspect plus grossier.

Les études antérieures à celles de M. Braune avaient conduit à conclure que si le fer et les alliages fer-carbone peuvent absorber des quantités importantes d'azote, du moins les produits industriels en renferment si peu qu'il ne saurait agir sur les propriétés de ces corps.

Savart et Desprez (*Annales de Chimie et Physique*, XLII, 122) ont montré que le fer, chauffé dans un courant d'ammoniac, voit son

poids augmenter de 11 0/0 et devient cassant. L'hydrogène, dans ces conditions, n'est pas absorbé; ceci découle des expériences de Frémy.

Stahlschmidt (*Poggendorff's Annalen*, CXXV, 37) était arrivé au même résultat, en traitant le chlorure de fer par l'ammoniac. Le fer obtenu renfermait 11,1 0/0 d'azote; l'auteur de ces recherches émit alors l'idée de l'existence d'une combinaison de formule Fe^4Az.

Le baron von Juptner, dans ses *Éléments de Sidérologie*, donne au sujet de l'azote ce seul renseignement : « L'azote est également retenu en faibles quantités, mais fortement par le fer solide; les recherches sur ce point sont tellement peu complètes et l'influence de l'azote sur les propriétés du métal est si peu importante qu'il nous suffira de les signaler. »

Les conclusions auxquelles est arrivé M. Braune (*Revue de Métallurgie*, juillet 1905) sont les suivantes : Un acier extra-doux (C = 0,06), auquel on a fait absorber des quantités croissantes d'azote, a montré une diminution très nette dans les allongements, quand l'azote atteint 0,08 0/0; s'il continue à augmenter, les allongements sont bientôt sensiblement nuls.

On sait que, pour 0,08 0/0 d'azote, les cellules de ferrite deviennent très petites, à peine 1/10 de leurs dimensions linéaires primitives; en même temps le ciment qui remplit leurs joints de séparation augmente d'épaisseur; le métal est alors complètement fragile.

Puis les bâtonnets prennent naissance.

Dans un acier très dur (C = 1,15), les allongements et la ténacité diminuent brusquement, quand la teneur en azote atteint 0,030 environ.

Pour un acier à 0,500 de carbone, la teneur critique est de 0,040.

Les teneurs en azote de 0,06 sont très rares dans les métaux industriels, tandis que celles de 0,03 et 0,04 sont assez fréquentes.

C'est pour ce motif, ajoute M. Braune, que les aciers durs deviennent beaucoup plus facilement fragiles que les aciers doux, parce que leur teneur critique en azote ne s'écarte pas beaucoup de celles que l'on peut rencontrer dans la fabrication industrielle.

L'azote exerce aussi une influence considérable sur les aciers trempés. L'azoture de fer, dans ce cas, se trouve en solution dans la martensite, comme il l'était dans la ferrite pour les aciers recuits. — L'influence de l'azote sur les propriétés électriques et magnétiques de l'acier est également considérable : dans le fer doux, en particulier, la force coercitive et l'hystérésis sont augmentées.

On conçoit de suite l'importance d'une telle découverte : comme l'a

fait remarquer M. Henri Le Chatelier (*Revue de Métallurgie*, mai 1905), comme nous l'avons noté dans *le Génie civil* (10 juin 1905), elle permet d'expliquer une série de faits importants : les aciers basiques et acides de même composition ayant subi le même traitement n'ont pas les mêmes propriétés mécaniques; les aciers cémentés (non trempés) sont d'une fragilité remarquable, les céments humides (par réaction des cyanures sur l'eau, il se forme de l'ammoniaque) sont des plus nuisibles, le titane joue dans les fontes et aciers un rôle épurateur important, etc.

La découverte de M. Braune ouvre donc un horizon tout nouveau et de la plus haute importance.

APPENDICE AU CHAPITRE VII

BRONZES ORDINAIRES

Recherches de Shepherd et Upton. — MM. Shepherd et Upton ont publié, dans le *Journal of Physical Chemistry* (vol. IX, n° 6, juin 1905), une étude sur les alliages de cuivre et d'étain. Des différentes conclusions des auteurs il faut retenir celles-ci :

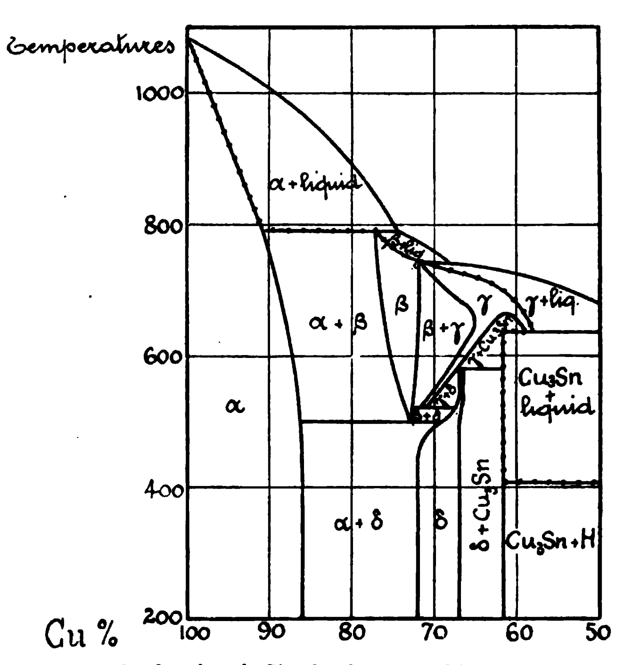


Fig. 208. — Recherches de Shepherd sur les alliages cuivre-étain.

Le constituant δ n'est pas, comme on l'a cru jusqu'ici, le composé défini, Cu^4Sn, mais bien une solution solide dont la concentration ne varie que dans une étroite limite.

L'étude faite des traitements à chaud conduit nettement aux mêmes conclusions que les recherches que nous avons faites sur la trempe des bronzes (Voir p. 491).

Shepherd et Upton ont. de plus, étudié le recuit; ils ont montré que les bronzes contenant entre 74 et 87 0/0 de cuivre sont beaucoup plus résistants, s'ils ont été recuits à la température de 510° qu'à une température inférieure; mais il ne faut pas que le recuit soit trop prolongé, sans quoi on abaisse la résistance à la rupture et on augmente les allongements.

Les bronzes qui ne renferment pas le constituant α ont des résistances à la traction très basses.

Bruts de fonte, les bronzes ont d'autant moins d'allongements que la teneur en cuivre est plus faible.

Il est possible de faire un bronze coulé avec une résistance extrême à la traction de 43 kilogrammes environ par millimètre carré et un allongement de 1,5 0/0 ou un bronze d'une résistance d'environ 32 kilogrammes par millimètre carré, avec un allongement de 39 0/0.

On peut, par un traitement convenable à chaud, varier l'allongement extrême d'un bronze contenant 90 0/0 de cuivre de 10 à 37 0/0 sans changer la résistance à la traction.

Recherches de Heyn et Bauer. — Ces auteurs ont cherché à déterminer l'influence de l'oxygène sur les bronzes ordinaires. Ils ont montré que l'oxygène se porte sur l'étain et fournit de l'acide stannique, lequel prendrait naissance dans l'alliage liquide, de par la réaction :

$$2Cu^2O + Sn = 4Cu + SnO^2.$$

Le microscope montre très nettement des filaments d'acide stannique.

Le traitement au phosphore les fait, bien entendu, disparaître entièrement.

APPENDICE AU CHAPITRE VIII

BRONZES SPÉCIAUX

Dans une très intéressante étude sur les bronzes mécaniques (*Engineering*, LXXIX, 400; 1905), M. Lewis donne la composition d'un certain nombre de bronzes très usités :

1° Pièces d'ajustage devant maintenir la vapeur, un liquide ou la pression hydraulique :

	I	II	III	IV
Cu	87	88	89	86
Sn	9	10	9	12
Zn	2	1	2	2
Pb	2	1	0	0

Les premiers alliages sont du type du métal à canons.

L'addition du plomb a pour but de faciliter le travail au tour du métal. Elle ne doit jamais dépasser 2 0/0.

L'alliage n° 4, qui est employé surtout pour la pression hydraulique, ne doit pas renfermer plus de 0,25 0/0 de plomb.

L'arsenic n'a pas, dans l'alliage à 90 cuivre, 10 étain, les inconvénients que l'on croit. Il en est de même de l'antimoine jusqu'à 0,3 0/0.

2° Pièces d'ajustage qui n'ont pas à supporter de fortes pressions, comme les graisseurs à huile :

Cu	80
Sn	3
Zn	15
Pb	2

Ce métal donne d'excellents moulages.

3° Bronzes phosphoreux pour soupapes :

Cu	84
Sn	14
Pb	2
Ph	0,05 environ

Nous avons nous-même examiné *dernièrement* une série de bronzes spéciaux provenant d'une même usine ; nous en donnerons les analyses :

Cu............	90,77	85,13	81,87	80,40	84,48
Sn............	8,45	13,67	16,85	18,60	9,17
Pb............	0,28	0,50	0,25	0,30	6,52
Zn............	0,18	traces	traces	0,10	traces
Ph............	traces	0,14	»	traces	»
Al............	»	0,65	0,50	»	»
Fe............	»	traces	traces	0,12	traces
	99,68	100,09	99,47	99,52	100,17

Comme on le voit, il représente l'échelle complète des bronzes mécaniques.

Les *Dürener Metallwerke* préparent des bronzes manganésifères ou phosphoreux dont ils garantissent les propriétés suivantes :

MÉTAL	ESSAI A LA TRACTION				DENSITÉ	TEMPÉRATURE de FUSION
	R	E	A 0/0	Σ		
Bronze manganésifère	35 à 63	15,0 à 61	39 à 8	78,5 à 70	8,35 à 8,40	950
Bronze phosphoreux..	44,5	40,0	32,5	75,5	8,90	1045

On parle actuellement d'essais faits sur les alliages cuivre-étain-nickel, avec d'assez faibles quantités de ce métal et qui auraient donné des résultats intéressants. Nous n'avons aucun renseignement précis sur ce sujet.

Il en est de même de bronze au molybdène, dont on dit du bien au point de vue frottement; le molybdène ne se comporterait donc pas vis-à-vis du cuivre comme le tungstène. Ceci paraît étonnant et mérite confirmation.

APPENDICE AU CHAPITRE X

LAITONS SPÉCIAUX

Nous avons exposé (p. 660) les premiers résultats des recherches que nous avons entreprises sur les laitons spéciaux. Cette étude a été poursuivie activement et nous a donné de nombreux résultats nouveaux. Bien qu'elle ne soit pas encore terminée, nous pouvons déjà en tirer des conclusions générales importantes.

Nous avons noté, dès le début de cette étude, que certains métaux se substituent au zinc dans une certaine proportion. Nous avons cherché à préciser ce phénomène.

Considérons un laiton de titre réel en cuivre A 0/0, de titre réel en zinc B 0/0, et renfermant q 0/0 d'un autre corps, tel que aluminium, manganèse, étain, etc.

Si nous examinons ce laiton au microscope, nous lui trouvons même microstructure qu'un alliage renfermant A′ 0/0 de cuivre et B′ 0/0 de zinc.

Nous appellerons A′ et B′ les titres fictifs de l'alliage considéré.

En résumé, tout se passe comme si, à la place de q 0/0 du corps étranger, nous avions introduit dans l'alliage un certain poids de zinc ; cet alliage, les proportions étant ramenées à 100, sera l'alliage fictif.

Nous appellerons coefficient d'équivalence du métal introduit, la quantité de zinc auquel se substitue 1 0/0 de ce métal, les proportions étant toujours ramenées à 100.

Un exemple fera mieux saisir :

Soit un alliage formé de 70 0/0 de cuivre, 28 0/0 de zinc et 2 0/0 d'un métal dont le coefficient d'équivalence est 4. Cherchons son titre fictif.

L'alliage correspond micrographiquement à :

Cu 70

$$Zn = 28 + (2 \times 4) = 36$$

et si l'on ramène les proportions à 100 :

$$Cu = \frac{70 \times 100}{106} = 66{,}03,$$
$$Zn = \frac{36 \times 100}{106} = 33{,}97.$$

Nous dirons que l'alliage considéré a pour titre fictif :

Cu	66,03
Zn	33,97

Cherchons à établir la relation qui existe entre le titre fictif et le titre réel.

On a :

$$A + B + q = 100,$$
$$A' + B' = 100.$$

Or B′ est égal à $B + tq$ ramené à 100, c'est-à-dire :

$$B' = \frac{(B + tq) \times 100}{A + B + tq}.$$

Donc :

$$A' + \frac{100\,(B + tq)}{A + B + tq} = 100,$$
$$A'(A + B + tq) + 100\,(B + tq) = 100.$$

Mais

$$A + B = 100 - q,$$
$$A'(100 - q + tq) + 100\,(\not{B} + t/q) = 100\,(A + \not{B} + t/q),$$
$$100\,A' + A'q\,(t - 1) = 100\,A,$$
$$A'q\,(t - 1) = 100\,(A - A').$$

D'où l'on tire :

1° $$q = \frac{100\,(A - A')}{A'(t - 1)},$$

équation qui permet de définir la quantité q de métal à coefficient d'équivalence t pour passer du titre réel A au titre fictif A′ ;

2° $$A' = \frac{100A}{100 + q\,(t - 1)},$$

équation qui permet de connaître le titre fictif d'un alliage de titre réel A, dans lequel on a remplacé q de zinc par q d'un autre métal de coefficient d'équivalence t ;

3°
$$t = 1 + \frac{100(A - A')}{q\,A'},$$

équation qui détermine le coefficient d'équivalence d'un corps, sachant que la substitution de q de ce corps à q de zinc, dans un alliage dont le titre réel est A, l'amène au titre fictif A'.

La question qui se pose de suite réside dans l'intérêt que peut présenter le titre fictif d'un laiton complexe. Cet intérêt est de la plus haute importance ; nous citerons de suite un cas important.

Considérons l'alliage :

Cu	70
Zn	30

Dans cet alliage, remplaçons 4 0/0 de zinc par 4 0/0 d'aluminium; nous avons la composition :

Cu	70
Al	4
Zn	26

Un tel alliage a pour titre fictif :

Cu	57
Zn	43

Il jouira de certaines propriétés de cet alliage; *il pourra notamment se laminer à chaud*, bien que contenant 70 0/0 de cuivre.

On peut alors se demander quel intérêt présente cet alliage à titre fictif :

Cu	57
Zn	43

sur celui qui serait réellement constitué par les mêmes proportions de cuivre et de zinc.

L'intérêt est incontestable : le corps incorporé apporte avec lui des propriétés mécaniques très nettes, et l'on peut dire, en résumé, que l'alliage de titre réel :

Cu	70
Al	4
Zn	26

qui a pour titre fictif :

Cu	57
Zn	43

a les propriétés de ce dernier alliage, mais améliorées.

Dans le cas qui nous occupe, l'alliage renfermant réellement cette proportion aura sur barre coulée les propriétés suivantes :

R	32,6
E	6,6
A 0/0	24

tandis que le premier qui renferme l'aluminium donne :

R	44,8
E	23,8
A 0/0	24,5

On voit l'amélioration très importante apportée par la présence de l'aluminium ; c'est surtout dans une augmentation de la limite élastique qu'il faut le plus souvent chercher l'influence du corps étranger.

On conçoit alors l'intérêt considérable que présente la détermination des coefficients d'équivalence. Mais un tel travail est de longue haleine.

Donnons cependant quelques-uns des résultats déjà obtenus.

Si nous nous reportons aux équations ci-dessus indiquées, on voit que, si l'on a : $t < 1$, il s'ensuit :

$$q\,(t-1) < o,$$

et comme

$$A' = \frac{100\,A}{100 + q\,(t-1)},$$

on a:

$$A' > A.$$

Donc, lorsque le coefficient d'équivalence est plus petit que l'unité, le titre fictif est supérieur au titre réel.

Les recherches que nous avons faites nous ont montré que les valeurs des coefficients d'équivalence pour les différents métaux sont :

Métaux	Valeur du coefficient d'équivalence.
Aluminium	6
Manganèse	0,5
Silicium	12

Ces valeurs ne sont encore qu'approchées ; nous cherchons à les préciser par de nouvelles expériences. D'autres coefficients seront déterminés, notamment ceux du fer, du magnésium, etc.[1].

Un autre cas peut se produire : le produit incorporé dans l'alliage ou se sépare (tel le plomb), ou forme un constituant nouveau, combinaison ou solution. C'est le cas de l'étain. Ceci est particulièrement intéressant ; en effet, lorsqu'on ajoute ce métal à un laiton qui est formé de la solution α et de la solution β, cet étain forme un constituant spécial qui paraît être le constituant δ des bronzes, et cela au détriment de la solution β. Or on sait que, dans les laitons renfermant de 55 à 62 0/0 de cuivre, la solution β est facilement attaquée par l'eau salée. D'où la supériorité bien connue des laitons à l'étain, à ce point de vue.

On voit, d'après ce que nous avons dit, que le manganèse amène l'alliage à un titre fictif supérieur au titre réel.

Le premier point qu'il nous a paru nécessaire de préciser, pour établir des comparaisons certaines, est le suivant : établir les propriétés mécaniques sur métal coulé des laitons simples et voir la relation qui existe entre ces propriétés et la constitution. Voici les résultats obtenus :

TENEUR EN CUIVRE	MICROGRAPHIE	R	E	A 0/0	Σ	CHOC	DURETÉ
66,8	Solution α	19,3	3,5	51	53,8	15	32
64,7	Solution α	21,4	4	55	53,8	17	39,5
62,4	Sol. α + traces de β	23,7	6,6	55	41,5	16	45,5
62,2	—	25,1	6,6	55	53,8	17	53
59,5	Sol. α + sol. β	26,6	6,8	44	40,1	10	57
57,9	—	35,6	6,6	44	49,9	13	73
56,4	Sol. β + un peu sol. α	32,6	?	26	28,6	10	73
54,8	Sol. β + traces de la sol. α	29,1	6,9	13	11	8	88
54,49	Sol. β uniforme	33	?	21	26	11	83
54,08	—	31,6	?	23	39,3	7	85
52,92	—	27,1	?	16	11	7	81
52,15	—	24,4	?	13	28,4	9	81
51,23	—	20,3	?	9	11	6	85
50,78	—	17,6	?	8,5	15,3	7	85
50,39	Sol. β + traces de la sol. γ	10,1	6,6	2,5	14	3	85
48,82		5,2	5,2	2	4,2	0	95

Il a été impossible de casser convenablement des alliages à teneur en zinc plus grande que celle du dernier.

1. Si l'on cherche à étudier les variations du titre fictif A′ en fonction de la

En résumé, ces essais précisent les différents points suivants :

1° Les allongements et les strictions vont constamment en diminuant. — Ils sont encore assez élevés pour les alliages formés de la solution β seule, au contraire de ce que l'on pouvait croire ;

2° La charge de rupture passe par un maximum pour 58 0/0 de cuivre, c'est-à-dire au moment où les solutions α et β sont sensiblement en quantités égales ;

3° Les limites élastiques de ces alliages sont extrêmement faibles ;

4° La résistance au choc décroît au fur et à mesure que la teneur en zinc croît ; elle est encore assez élevée pour tous les alliages formés de la solution β uniforme ; la grande fragilité apparaît seulement quand la solution γ prend naissance ;

5° La dureté croît avec le zinc ; elle est en quelque sorte proportionnelle à la teneur en solution β pour ceux formés de α + β. — Elle est constante pour les alliages formés de β uniforme ; elle continue à croître, lorsque la solution γ apparaît.

Un mémoire très détaillé sera ultérieurement publié sur les laitons spéciaux.

Les *Dürener Metallwerke* ont donné, à propos de l'exposition de Liège, quelques résultats intéressants sur leur métal spécial, qui, d'après un échantillon que nous avons eu entre les mains, renferme peu de cuivre (55 à 56) et 1 à 2 0/0 d'étain. Nous résumons les chiffres donnés dans le tableau suivant :

FORME DU MÉTAL	ESSAI A LA TRACTION			
	R	E	A 0/0	Σ
Tôles	43 à 63	20 à 60	36 à 11	64 à 58
Barres	42 à 67	15 à 60	38 à 4,5	57 à 35
Pièces de forge	48 à 50	25 à 30	22 à 20	32 à 50
Pièces coulées	41 à 47	18 à 20,5	22 à 34	32 à 38

quantité q du corps étranger incorporé, on voit que ces variations suivent une loi hyperbolique : $A = \frac{100A}{100 + q\,(t-1)}$.

Les asymptotes des hyperboles sont l'axe des x et une parallèle à l'axe des y : $x = -\frac{100}{t-1}$.

APPENDICE AU CHAPITRE XII

AUTRES ALLIAGES DE CUIVRE

Cuivre-Plomb. — Nous avons indiqué, page 765, la courbe de fusibilité de ces alliages, telle qu'elle résulte des recherches de M. Roland-Gosselin.

Roberts-Austen a démontré que cette courbe était absolument fausse et qu'elle affectait la forme de la figure 209.

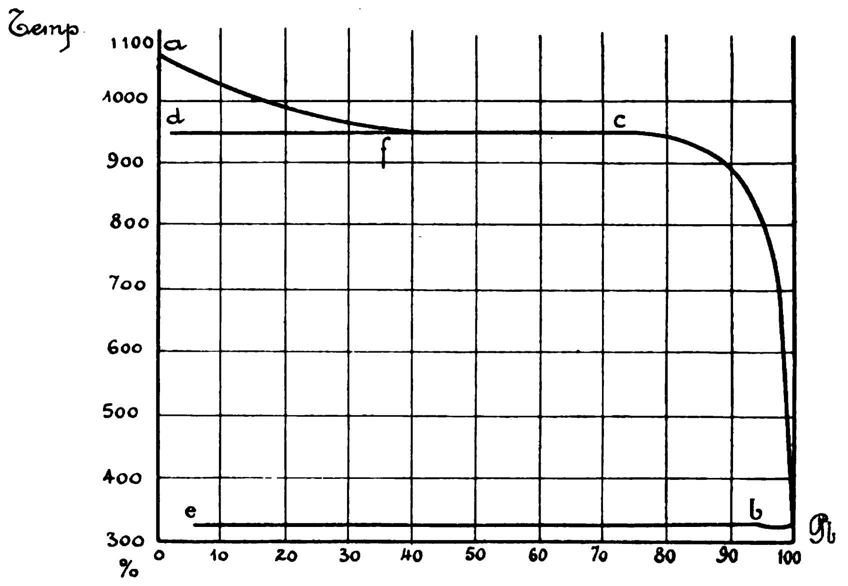


Fig. 209. — Courbe de fusibilité des alliages cuivre-plomb (Roberts-Austen).

Elle est donc composée de deux horizontales *dc* et *ab* raccordées par la courbe *cb* et d'une branche sensiblement droite *af*. — Il faut donc admettre que la plupart de ces alliages se séparent en cuivre et plomb. C'est bien ce que nous avait montré la micrographie, alors que nous ignorions ces recherches, de Roberst-Austen, qui nous ont été indiquées par M. H. Le Chatelier et par M. Osmond.

APPENDICE AU CHAPITRE XX

ALLIAGES DE NICKEL

RECHERCHES SUR LES ALLIAGES CUIVRE-NICKEL

Les recherches que nous avons entreprises sur les alliages cuivre-nickel ne sont pas encore achevées. — Cependant nous avons déjà obtenu quelques résultats intéressants qu'il nous semble nécessaire de citer.

Au point de vue micrographique, on distingue nettement deux solutions dans les alliages nickel-cuivre renfermant moins de 50 0/0 de nickel. Nous n'avons pu encore définir les degrés de concentration de ces solutions.

Un recuit prolongé produit l'uniformisation de la solution ; la microstructure apparaît sous forme de polyédries, et le phénomène peut être rapproché de ce qui se passe avec les laitons à cartouche (Cu = 67, Zn = 33)[1].

Nous avons cru tout d'abord nous trouver en présence de deux solutions ainsi que nous l'avons indiqué dans l'*Album de la Micrographie.* Il n'en est rien, on ne trouve qu'une solution, le cuivre et le nickel paraissent se dissoudre en toutes proportions. Ceci est en contradiction avec *la courbe de fusibilité.*

Nous avons déterminé les propriétés mécaniques de quelques alliages ; nous les résumerons dans le tableau suivant :

1. Nous avons retrouvé ce phénomène dans les alliages cuivre-étain formés de la solution α.

ÉTAT	TENEUR en cuivre °/o	R	E	A °/o	Σ	CHOC	DURETÉ	COULEUR
Brut d'étirage.	94,91	19,8	16,5	27	51,8	22	63	Rose franc
—	90,70	19,1	16,3	14	46,8	20	61	Rose pâle
—	85,66	31,0	30,8	2	11,0	7	73	Blanc jaunâtre
—	80,60	32,3	32,3	3	10,2	6	73	Blanc très net
—	70,15	32	30,5	6	19,0	3	88	Blanc gris
Recuit à 750..	94,91	16,5	3,3	44	49,8	32	53	Rose franc
—	90,70	16,3	2,7	40	57,1	34	53	Rose pâle
—	85,66	15,1	2,1	19	25,2	10	57	Blanc jaunâtre
—	80,60	23,7	19,7	15	16,4	8	60	Blanc très net
—	73,95	24,4	19,3	9	16,4	7	65	Blanc gris
—	70,27	25,3	22,4	9	18,8	4	71	Blanc gris

Si l'on compare ces résultats entre eux, on remarque :

1° L'influence extraordinaire de l'écrouissage sur la limite élastique des alliages à basse teneur en nickel; recuits, les alliages renfermant jusqu'à 15 0/0 de nickel ont une limite élastique extraordinairement basse (2 à 3 kilogrammes par millimètre carré), et dans les produits laminés, recuits, étirés (passe de 2 millimètres d'étirage), la limite élastique atteint 16 et même, pour le plus riche en nickel, 30 kilogrammes par millimètre carré. Sous le même traitement, la charge de rupture ne s'est accrue que de 3 kilogrammes pour les premiers et de 15 kilogrammes par millimètre carré pour le dernier;

2° L'influence du nickel sur les propriétés du cuivre est très peu sensible, tant que la teneur ne dépasse pas 15 0/0, ensuite la charge de rupture augmente, tandis que, brusquement, la limite élastique prend une valeur élevée. Les allongements, d'abord extrêmement élevés, deviennent assez faibles dès que le nickel dépasse 15 0/0 ; la résistance au choc s'abaisse très nettement pour le même pourcentage, tandis que la dureté croît.

Nous continuons cette étude, qui fera ultérieurement l'objet d'un mémoire spécial.

APPENDICE AU CHAPITRE XXII

ALLIAGES D'ALUMINIUM

RECHERCHES DE M. SHEPHERD SUR LES ALLIAGES D'ALUMINIUM ET DE ZINC

Shepherd a publié un travail très complet sur les alliages d'aluminium et de zinc (*Journal of Physical Chemistry*, vol. IX, n° 6, juin, p. 504). Nous donnons le diagramme qu'il a déterminé ; la courbe de fusibilité est celle obtenue précédemment par Heycock et Neville (*Journ. Chemic. Soc.*, LXXII, p. 383; 1897), qui diffère un peu de celle de Gautier.

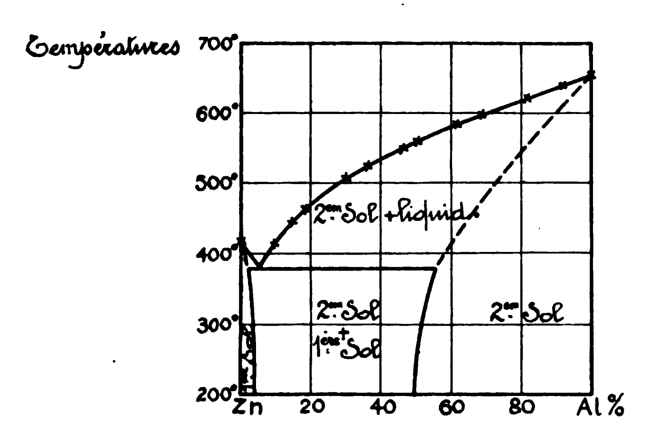


Fig. 210. — Diagramme des alliages aluminium-zinc (Shepherd).

D'après cette courbe, il n'y a que deux phases solides : l'existence de composé défini doit être absolument exclue. Au point de vue microscopique, tous les alliages à plus de 50 0/0 d'aluminium sont homogènes. Pour des teneurs en aluminium inférieures à 60 0/0, on note un eutectique dont la composition correspond à 5 0/0 d'alumi-

nium. Il faut admettre l'existence d'une solution solide pour les alliages renfermant plus de 50 0/0 d'aluminium. Il existe, de plus, une solution zinc-aluminium dont la teneur en aluminium peut atteindre 4 0/0.

Nous remarquons que ce travail montre à nouveau l'existence de solutions solides que l'on ignorait jusqu'ici. Le cas de l'existence de solutions solides est beaucoup plus fréquent qu'on peut le croire; les travaux de M. Shepherd, qui sont d'une précision remarquable, auront assurément beaucoup fait pour la vulgarisation de cette idée si importante pour l'industrie. On ne saurait trop en féliciter ce savant.

Recherches de M. Grube sur les alliages magnésium-aluminium. — Le Laboratoire de chimie inorganique de l'Université de Göttinge, dirigé par M. Tammann, vient de publier une série de mémoires sur les alliages : ces études sont extrêmement minutieuses ; nous regrettons vivement qu'elles nous soient parvenues au dernier moment et que nous n'ayons pu, de ce fait, reproduire les diagrammes très intéressants qu'elles renferment.

Nous renvoyons, pour plus amples renseignements, au *Zeitschrift fur anorganische chemie.*

Dans une étude sur les alliages aluminium-magnésium qui fait partie de ces publications, M. Grube a obtenu des résultats différents de ceux de M. Boudouard. Il n'a pu obtenir qu'une combinaison Al^3Mg^4, qui serait susceptible de former avec Al des cristaux mixtes.

Pour les alliages renfermant de 5 à 30 0/0 de magnésium, la dureté croît avec la teneur en magnésium ; ils sont formés d'aluminium entouré d'eutectique Al — Al^3Mg^4.

Les alliages contenant de 35 à 55 0/0 de magnésium sont formés de cristaux mixtes qui sont durs et argentés.

Les alliages renfermant de 55 à 68 0/0 de magnésium sont formés de cristaux Al^3Mg^4 et de l'eutectique Al^3Mg^4 — Mg.

L'auteur signale que l'on peut utiliser pour les miroirs métalliques les alliages qui contiennent de 35 à 55 0/0 de magnésium.

Recherches de M. Petrenko sur les alliages argent-aluminium. — Au même laboratoire, M. Petrenko a établi pour les alliages argent-aluminium un diagramme duquel on peut conclure que ces métaux forment entre eux deux combinaisons Ag^2Al et Ag^3Al.

La première serait susceptible d'exister sous deux formes ; son point de transformation serait de 718°.

APPENDICE AU CHAPITRE XXIII

ALLIAGES DE MAGNÉSIUM

De nombreuses et intéressantes recherches sur les alliages de magnésium viennent d'être terminées au Laboratoire de Göttinge. Nous résumerons très brièvement les principales :

Magnésium-plomb. — M. Grube a montré l'existence d'une combinaison de formule $PbMg^2$, fondant à 555°, et de deux eutectiques, le premier renfermant 65 0/0 de plomb et fondant à 457°, le second correspondant à 97,5 0/0 de plomb et fondant à 250°.

La combinaison $PbMg^2$ est aigre, inaltérable à l'air sec, mais se décomposant très rapidement à l'air humide en donnant :

$$PbO,2MgO,3H^2O.$$

Magnésium-étain. — MM. Kurnakow et Stepanow ont établi l'existence d'une combinaison Mg^2Sn fondant à 795° (donc à une température bien plus élevée que le magnésium) et de deux eutectiques. — Le premier est formé de 8,5 0/0 de magnésium et fond à 203°, l'autre correspond à 88 0/0 de magnésium et fond à 582°.

APPENDICE AU CHAPITRE XXVI

ALLIAGES D'OR

Parmi les recherches faites dernièrement au Laboratoire de Gottinge, il faut citer :

Alliages d'or et d'étain. — M. Vogel établit l'existence des trois combinaisons : AuSn, $AuSn^2$ et $AuSn^4$.

Alliages d'or et de plomb. -- M. Vogel a montré l'existence des composés Au^2Pb et $AuPb^2$.

ANALYSES DE QUELQUES MÉTAUX INDUSTRIELS

FER

RÉFÉRENCES	MARQUES	C	Si	As	P	S	Cu	Al	Mn	Ni + Co
Arnold	Suède	0,07	0,02	0,04	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	»
Charpy	—	0,07	0,01	»	traces	0,01	»	»	0,14	»
Howe	—	0,022	traces	»	0,007	0,014	0,100	»	0,000	»
Farker	Fer puddlé	0,100	0,06	»	0,25	0,03	0,04	»	0,01	»
—	—	0,110	0,11	»	0,11	0,01	0,02	»	0,01	»
—	Fer fondu	0,150	0,02	»	0,06	0,06	traces	»	0,50	»

ÉTAIN

RÉFÉRENCES	DÉSIGNATION	Cu	As	Sb	Ni + Co	Fe	Zn	Pb	Bi
Hollard et Bertiaux	Etain allemand	0,480	0,079	0,545	»	»	»	0,000	0,060
—	Etain suisse	»	0,022	1,174	»	»	»	0,498	0,580
—	Etain du Tonkin	0,000	0,034	0,110	0,028	0,040	»	0,076	»
—	Etain chinois	0,040	0,118	0,044	»	0,037	»	0,833	»
—	Etain Détroit	0,030	0,033	0,000	0,014	0,008	0,000	0,081	»

Les principaux étains utilisés dans le commerce portent les marques suivantes (par ordre de valeur) :
1° Banka ; 2° Billiton et Détroit; 3° Anglais; 4° étain chinois et étain à 99 0/0; 5° étain à 98 0/0; 6° étain à 97 0/0; 7° étain à 90 0/0 (n'est guère utilisé que pour les couverts) et étain de Bolivie.

CUIVRE

RÉFÉRENCES	MARQUES	Ag	Au	As	Sb	Bi	Pb	Fe	Co	Ni	S	O	Zn	Cu	Te
Campredon.............	Oker	0,072	0,0001	0,130	0,095	0,052	0,061	0,063	0,012	0,064	0,001	0,1166	»	»	»
—	Métal ancien	0,010	»	1,010	0,020	0,045	0,085	0,020	»	0,083	traces	0,055	traces	»	»
—	?	0,014	»	0,020	0,002	0,021	0,023	0,005	»	0,069	»	0,023	»	»	»
Wagner, Fischer et Gautier.....	Mausfeld MRA	0,025	»	»	»	»	0,049	0,016	»	0,240	traces	»	»	99,587	»
—	—	0,025	»	»	»	»	0,034	0,013	»	0,107	traces	»	»	99,751	»
—	—	0,027	»	»	»	»	0,029	0,014	»	0,109	traces	»	»	99,764	»
—	— MRB	0,015	»	»	»	»	0,163	?	»	0,427	traces	»	»	99,213	»
—	— MRB	0,011	»	»	»	»	0,145	?	»	0,396	traces	»	»	99,310	»
—	Cuivre électro	Ag + Au 0,0050		»	0,0008	»	»	traces	»	»	»	0,0024	»	99,9937	»
—	—	0,0040		»	0,0011	»	»	traces	»	»	»	0,0028	»	99,9946	»
Hampe..................	Mausfeld	0,0280	»	0,0228	0,0031	»	0,0232	0,0039	»	0,2142	0,0021	0,1546	»	99,5200	»
—	—	0,0292	»	0,0172	0,0023	»	0,0200	0,0039	»	0,2112	0,0024	0,0752	»	99,6125	»
Fufahl..................	Wallaroo	0,015	»	»	»	»	0,004	0,001	»	0,039	»	0,127	»	99,795	»
—	CHMCo	0,028	traces	traces	»	»	»	traces	»	0,002	»	0,120	»	99,864	»
—	Mausfeld	0,031	»	0,072	traces	»	0,038	0,001	»	0,201	»	0,145	»	99,491	»
—	Bede	0,058	traces	0,600	0,002	»	0,023	0,001	»	0,081	0,005	0,090	»	99,148	»
—	Grange	0,010	»	0,766	0,011	»	0,005	0,004	»	0,066	traces	0,160	»	98,961	»
Egleston...............	Colorado	0,135	»	0,091	»	»	»	0,031	»	0,024	traces	»	»	99,705	0,083

CUIVRE (ANALYSES DE M. HOLLARD)

VARIÉTÉS DE CUIVRES	Cu	Ag	Au	As	Sb	Sn	Ni + Co	Fe	Zn	Pb	Bl	
1. *Chili*												
Urmeneta	97,668	0,0395	0,0016	0,094	0,102		0,314	0,577		0,000	0,034	
	96,979	0,0369	0,0016	0,073	0,070		0,413	1,248		0,042	0,053	
	99,915	0,0129		0,009	0,002		0,005			traces		
Lota	99,822	0,0243			0,038		0,037	traces		0,029		
	99,775	0,0092	0,0007	0,016	0,004		0,027			traces	traces	
Catémou	98,623	0,0849	0,0001	0,047	0,000		0,114	0,295		0,021	0,034	
2. *Lac Supérieur*. Calumet et Hecla	99,963	0,0272		0,009	0,000		0,000			traces		
Tamarac	99,741	0,1120			0,013		0,000	0,004	0,000	0,000		
	99,862	0,0155		0,037	0,004		0,007	traces		traces		
Quincy	99,844	0,0940			0,005		0,000	0,008	0,000	0,000		
Oscéola	99,898	0,0430		0,037	0,010		0,012			traces		
Oscéola	99,813	0,0480		0,033	0,088		0,008	0,002		0,000	0,010	
3. *Boléo* (presqu'île de Californie)	96,580			0,039	0,054		0,311 | 0,419	0,955		0,172	0,000	S = 0,124
	91,818	0,0192	traces	0,028	0,018	0,106	0,967	4,420	0,653	0,006	0,000	
	90,022	0,0190	traces	0,041	0,006	0,164	0,900 | 1,130	5,232	0,700	0,233	0,015	Mn = 0,124
4. *États-Unis*												
Electro Montana	99,835	0,0000			0,010		0,007	0,004		traces		
Arizona	99,731				0,096		0,053	0,017				
5. *Bolivie*												
Corororo	99,842	0,0000			0,027		0,039	0,008		0,000		
6. *Australie méridionale*												
Wallaroo	99,610			0,002	0,074		0,236	0,000		0,000	0,040	
Colzar (Electro)	99,947			0,008	0,026		0,009	0,006		0,000	0,004	
7. *Japon*												
Sumitomo	99,806	0,0142	0,0004	0,009	0,020		0,046	0,006		0,000	0,003	
Furukawa	99,262	0,1002	traces	0,068	0,016							
Furukawa	98,996	0,1134	0,0002	0,022	0,018							
Kohusen	98,224	0,0624	0,0024	0,062	0,088							
Yokohama	99,671	0,0472	0,0003	0,041	0,076		0,047			0,050	0,000	
Kitagawa	99,371	0,0238	0,0004	0,077	0,052		0,066			0,018		
Hibira	98,856	0,0150	0,0016	0,032	traces		0,080	0,038		0,026	traces	
Mitsu-Bishi (électro)	99,983			0,000	0,012			traces		0,000	traces	
Segawa-Orokawa	98,589	0,0282	traces	0,072	0,030		0,020	0,038		0,043	traces	

Les principaux cuivres utilisés dans le commerce sont (par ordre approximatif de valeurs).

Comme *cuivres fins* :

1° L'electro en cathodes ou en lingots ; 2° le Best-Rio ; le Cape ; le Calumet ; le Champion ; le Baltic ; 3° le tough Rio.

Comme *cuivres vieux* :

1° Les foyers de chemins de fer ; 2° les fils ; 3° les rognures neuves, les tombants de planches ; 4° les chaudières ; 5° les mitrailles ; 6° les mitrailles étamées.

ZINC

RÉFÉRENCES	Zn	Pb	Fe	Cd	Sn	Cu	Ag	As
Campredon	98,570	1,370	0,029	0,053	0,024	»	»	»
—	96,249	3,610	0.064	0,077	traces	»	»	»
—	97,780	2,150	0,015	0,051	»	»	»	»
—	99,108	0,670	0,019	traces	»	»	»	»
—	95,761	4,220	0,019	traces	»	»	»	»
—	98,120	1,730	0,114	0,036	»	»	»	»
Schneider et Peterson		1,4483	0,0280	0,0245	»	0,0002	0.0017	traces
— —		1,7772	0,0280	»	»	»	traces	»
— —		1,1921	0,0238	»	»	0,0002	0,0007	»
— —		0,633	0,0320	0,0540	»	traces	traces	»
Hollard et Berteaux, Sardaigne	»	0,125	0,016	0,000	»	0,010	»	»
— Campine (Hollande)	»	0,856	0,024	0,000	»	0,010	»	»
— Vieille Montagne (Fonte d'art)	»	0,540	0,049	traces	»	0,000	»	»
— — (Laiton)	»	1,070	0,016	0,010	»	0,000	»	»
— — (Extra pur)	»	0,192	0,049	traces	»	0,002	»	»
— zinc électro	»	0,156	0,008	»	»	traces	»	»
— zinc électro	»	0,104	0,016	traces	»	traces	»	»
— zinc électro	»	0,149	0,038	traces	»	0,000	»	»
— Hohenlohe (Silésie)	»	1,154	0,033	traces	»	0,000	»	»
— Refinado (Cie Asturienne)	»	0,180	0,015	0,000	»	0,000	»	»
— Côte-d'Or	»	1,450	0,063	traces	»	0,000	»	»

On sait que la Société de la Vieille-Montagne a plusieurs marques de zinc dont les principales sont :

1° Extra-pur A renfermant moins de 0,1 0/0 de matières étrangères
2° Extra-pur B — de 0,3 0/0 —
3° Fonte d'art M 11 — de 0,75 0/0 —
4° Laiton affiné — de 1,3 0/0 (zinc n° 1 du commerce)
5° Laiton ordinaire — de 2 0/0 (zinc n° 2 du commerce)

PLOMB

RÉFÉRENCES	Cu	As	Sb	Sn	Ni+Co+Zn	Fe	Ag	Bi	Mn	S
Hollard et Berteaux. Sardaigne	0,013	0,007	0,026	0,000	0,013	0,006	»	0,015	»	»
— id.	0,000	0,118	0,000	0,000	0,010	0,015	0,0009	0,030	0,000	»
—	0,010	0,004	0,018	0,000	0,025	0,003	traces	0,012	0,000	0,018
— Auvergne	0,005	0,002	0,028	»	0,028	0,011	»	0,028	0,000	»
— Penarroya (Espagne)	traces	»	0,003	0,000	0,005	0,012	»	0,091	»	»
— Hoboken-les-Anvers	0,000	0,000	0,008	0,021	0,007	0,014	0,0003	0,120	»	»
—	0,040	0,007	0,010	0,000	0,016	0,010	traces	traces	0,000	»
—	traces	0,024	0,008	0,000	0,008	0,010	0,0015	0,030	»	»
— Laurium	0,133	»	0,681	0,000	traces	traces	1,9550	0,012	»	»
— Plomb désargenté	0,003	0,005	0,036	0,090	0,100	0,064	»	0,014	»	»
—	traces	»	traces	»	0,012	traces	traces	0,480	»	»
—	0,057	»	»	0,000	traces	0,002	traces	traces	»	»
— Perth-Amboye	traces	»	»	0,000	traces	0,003	traces	0,004	»	»
Jagnaux	0,048	traces	0,108	»	»	0,084	»	»	»	0,174
—	0,016	0,016	0,084	»	»	0,007	»	»	»	0,010
Reich	0,250	0,160	traces	»	»	0,050	0,53	»	»	»
Keith	0	traces	traces	»	»	0	0,00007	»	»	»

BISMUTH

RÉFÉRENCES	PROVENANCES	Bi	Sb	As	Cu	S	Ag
Wagner, Fischer et Gauthier....	Saxe	99,770	»	»	0,080	0,010	0,050
—	Pérou	93,372	4,570	»	2,058	»	»
—	Australie	94,103	2,621	0,290	1,944	0,430	»

NICKEL (ANALYSES DE M. HOLLARD)

VARIÉTÉS DE NICKELS	Cu	As	Sb	Sn	Co	Fe	Zn	Pb	S	MgO	Cao	Sio	GRAPHITE	C total	Ni + CO
1. *Nickels bruts*															
Nickel américain en grains.......	0,116	0,028	0,034			0,497	0,000	0,010		0,307	0,262	1,169			
Nickel en grenailles.............	0,126	0,073	0,040	0,038	0,706	0,626		0,072							
Nickel en grenailles.............	0,156	0,029	0,025	0,096	0,525	0,497		5,015							
Nickel de Silésie.................	0,334	0,008			0,190	0,391		0,000	0,000			0,858			
Nickel en cubes.................	0,236	0,008	0,012			0,644	0,000	0,003		0,000	0,104	0,732			
Nickel en cubes.................	0,062	0,006	0,014		1,552	0,253	0,000	0,000	0,022	0,022	0,071	0,467	0,147	0,289	
2. *Nickels affinés*															
Monnaie française (1903).........	0,102				1,587	0,254			0,039	0,000	0,000	0,254			99,437
Nickel anglais...................	0,058				1,402	0,647		0,000	0,015			0,184			
Nickel électro...................	0,030	0,008			1,400	0,436		0,000	0,000			0,017			
Nickel électro...................	0,040	0,006			0,710	0,046		0,000	0,000						
Nickel électro...................	0,026					5,058			0,005	0,000	0,000	0,031			
Nickel..........................	0,104	0,011	0,024		1,449	0,311	0,000	0 000	0,010	0,000	0,005	0,222			97,857 + 1,440
Nickel..........................	0,392	0,015	0,060			0,514			0,076			0,900			

ALUMINIUM

RÉFÉRENCES	MARQUES	C	Si	S	P	Pb	Cu	Fe	Cr	Na	Al	Az	Mn	Zn	Ni + Co
Campredon.........	»	0,2000	0,4245	0,0068	0,0220	0,2040	0,9385	0,6840	»	0,1800	»	»	»	»	»
—	»	0,1000	0,1465	0,0027	0,0290	0,0736	0,4790	0,5860	»	0,1400	»	»	»	»	»
—	»	0,4450	0,0933	traces	0,0007	0,3074	0,5710	0,6840	0,5150	0,1597	»	»	»	»	»
—	»	0,4750	0,0280	0,0110	0,0200	0,1814	0,5750	0,6500	0,5836	0,1600	»	»	»	»	»
—	»	0,1600	0,0840	0,0220	traces	0,5028	0,2719	0,9260	»	0,1790	»	»	»	»	»
—	»	0,0500	0,1979	0,0038	0,0050	0,6270	0,9390	1,2320	0,3752	0,0200	»	»	»	»	»
Moissan......... ..	Pittsburg 1898...	0,41	0,15	néant	»	»	0,35	0,27	»	0,10	98,82	traces	»	»	»
—	Neuhausen 1896.	0,30	1,94	»	»	»	»	1,08	»	»	96,12	»	»	»	»
—	Aluminium 1897.	»	0,05	»	»	»	traces	0,19	»	»	99,80	»	»	»	»
—	»	»	0,03	»	»	»	traces	0,32	»	»	99,18	»	»	»	»
Hollard et Bertiaux	»	»	0,221	»	»	0,000	0,036	0,109	»	»	»	»	traces	0,562	0,018
—	»	»	»	»	»	»	0,150	0,661	»	»	»	»	0,040	0,000	»
—	»	»	»	»	»	0,000	0,578	0,913	»	»	»	»	»	0,000	0,757
—	»	»	traces	»	»	»	0,000	0,179	»	»	»	»	»	0,000	traces
—	»	»	0,109	»	»	0,000	0,036	0,400	»	»	»	»	traces	»	0,130 [1]
—	»	»	0,377	»	»	0,123	0,848	0,544	»	»	»	»	0,000	0,000	0,040

1. Ce chiffre donne Ni + Co + Zn.

TABLE GÉNÉRALE DES MATIÈRES

CHAPITRE II

Généralités sur les alliages

TRAITEMENT DES ALLIAGES

CHAPITRE III

Alliages de fer et de carbone. — Aciers. — Fontes

ÉTUDE THÉORIQUE DES FERS ET ACIERS

CHAPITRE IV

Aciers spéciaux

CHAPITRE V

Alliages utilisés en sidérurgie

CHAPITRE VI

Autres alliages de fer

CHAPITRE VII

Alliages de cuivre et d'étain. — Bronzes ordinaires

CHAPITRE VIII

Alliages de cuivre. Bronzes spéciaux

CHAPITRE IX

Alliages de cuivre et de zinc

LAITONS ORDINAIRES

CHAPITRE X

Alliages de cuivre. — Laitons spéciaux

CHAPITRE XI

Alliages de cuivre; cuivre-aluminium. — Bronzes d'aluminium

CHAPITRE XII

Alliages de cuivre. — Autres alliages

CHAPITRE XIII

Alliages d'étain

CHAPITRE XIV

Alliages de plomb

CHAPITRE XV

Alliages de cadmium

CHAPITRE XVI

Alliages de zinc

CHAPITRE XVII

Alliages d'antimoine

CHAPITRE XVIII

Alliages de bismuth

CHAPITRE XIX

Antifrictions

CHAPITRE XX

Alliages de nickel

CHAPITRE XXI

Alliages de cobalt

CHAPITRE XXII

Alliages d'aluminium

CHAPITRE XXIII

Alliages de magnésium

CHAPITRE XXIV

Alliages de mercure. — Amalgames

CHAPITRE XXV

Alliages d'argent

CHAPITRE XXVI

Alliages d'or

CHAPITRE XXVII

Alliages de platine et des métaux de la mine du platine

CHAPITRE XXVIII

Alliages de manganèse

CHAPITRE XXIX

Alliages divers

CHAPITRE XXX

Résumé 1052

APPENDICES

TABLE ALPHABÉTIQUE DES MATIÈRES

Pages.

TABLE DES NOMS D'AUTEURS

TABLE DES FIGURES

TOURS, IMPRIMERIE DESLIS FRÈRES, 6, RUE GAMBETTA.

T. II. *Aciers au chrome, au tungstène, au molybdène, à l'étain, au titane, au vanadium, à l'aluminium, au cobalt.* In-4° 22 × 28 de 133 pages, avec 170 fig.. 10 fr.

Examen et étude de chacun des aciers indiqués au point de vue de la structure micrographique, de la ténacité, de la limite élastique, de l'allongement de rupture, de la striction, de la fragilité sur les barreaux entaillés, de la dureté à la bille de Brinell. Comparaison des propriétés et classification des aciers ternaires.

Recherches sur les aciers au nickel à hautes teneurs, par L. Dumas, ing. des Arts et Manufactures, ing.-conseil, ancien chef du service métallurgique de la Société de Commentry-Fourchambault et Decazeville. In-8° 16 × 26 de 208 pages avec 13 figures.............................. 6 fr.

Propriétés physiques et mécaniques des aciers au nickel à hautes teneurs. Aciers au nickel proprement dits. Aciers au nickel carburés, chromés et manganésés. Conclusions relatives à la transformation irréversible. Aciers et alliages à très hautes teneurs en nickel, chrome et manganèse. Vues théoriques. Applications. Bibliographie.

Recherches physiques et physico-chimiques sur l'acier au carbone, par Carl Benedicks. In-8° 16 × 27 de 230 pages avec 41 figures et 13 planches de photogrammes.................................... 12 fr. 50

Aciers étudiés. Composition chimique. Micrographie. Densité. Étude chimique du carbone. Elasticité. Dureté. Résistance électrique. Propriétés magnétiques. Existence dans les aciers >0,5 de C d'un nouveau constituant structural (ferronite). Vue d'ensemble. Conclusions pratiques. Bibliographie.

Album de 127 planches lithographiées concernant la fabrication de la fonte. Hauts fourneaux et accessoires, chaudières. Machines et appareils divers, par Pavloff, prof. à l'Ecole supérieure des Mines d'Ekaterinoslav. La légende des planches est en français, en anglais et en russe. In-folio oblong 34 × 26.. 25 fr.

Broyeur. Four de grillage. *Hauts fourneaux :* Chemise et brique réfractaires. Revêtement en tôle. Marates en fer et fonte. Blindages. Bâches. Porte-vents. Tuyères. Appareils de prise de gaz. Appareils de chargement. Gueulard. Plate-forme. Monte-charges. Plan incliné. Wagonnets, brouettes et bennes. Hauts fourneaux divers. Conduites de gaz. Laveurs de gaz. Chaudières, foyers et bâtiments des chaudières des hauts-fourneaux. Machines soufflantes. Appareils à air chaud. Soupapes et vannes de vent chaud. Poche à laitier. Halle de coulée. Poches à fonte. Mélangeur. Machine à mouler. Magasin et cases à minerais.

Album de dessins concernant la fabrication de l'acier Martin. 1er *fascicule.* Fours Martin, par H. Pavloff, professeur à l'Ecole supérieure des Mines d'Ekaterinoslav. Atlas in-4° de 52 planches de format oblong, avec légende explicative en français, anglais et russe.................. 15 fr.

Fours Martin de différentes usines. Fours Campbell et Wellman. Laboratoires et carneaux. Brûleurs. Régénérateurs et sacs à scories. Conduites d'arrivée des gaz et galeries de fumées. Valves et appareils de renversement. Armatures métalliques. Disposition générale des fours Martin aux aciéries.

Métallurgie du zinc, par A. Lodin, ingénieur en chef des Mines. In-8° 16 × 25 de 810 pages avec 25 planches et 275 figures. Broché........ 35 fr.

Historique. Réactions fondamentales de la métallurgie du zinc. Gites zincifères. Principes généraux de la métallurgie du zinc. Calcination des calamines. Grillage des blendes. Procédés d'utilisation partielle du gaz sulfureux. Utilisation complète du soufre contenu dans les gaz. Etude détaillée des diverses méthodes de réduction des minerais de zinc. Etude détaillée des divers types de fours. Opérations accessoires de la métallurgie du zinc. Réduction directe au four à cuve ou au réverbère. Production du zinc par électrolyse. Fabrication du blanc de zinc. Statistique de la production du zinc.

L'industrie aurifère, par David Levat, ancien élève de l'Ecole Polytechnique, ingénieur civil des Mines, membre du Comité supérieur des colonies. In-8° 16 × 25 de xvi-900 pages, avec 253 figures et planches. Broché, 30 fr. ; cartonné.. 32 fr.

Considérations générales. Propriétés de l'or *Extraction de l'or, de ses minerais.* Généralités. Alluvions aurifères. Prospection et cubage des placers. Méthodes d'exploitation des alluvions. *Filons.* Généralités. Traitement du quartz aurifère avec or libre. Traitement des quartz contenant de l'or non amalgamable. Chloruration. Cyanuration. *Monographies d'installations types.* Revue de la production mondiale en 1904. Divers. *Conclusions.* Index alphabétique (1.850 rubriques).

Les métaux. Leurs propriétés résistantes et leur emploi dans le matériel des chemins de fer, par LEBASTEUR, ingénieur du matériel de la Cie P.-L.-M. In-4° 23 × 31 de 300 pages, avec figures et 8 planches........... 12 fr. 50

Multiplicité et classification des métaux ferreux. Essais par traction. Machines à essayer par : traction, flexion, compression, torsion et choc. Circonstances qui influent sur les propriétés résistantes des métaux. Classification des fers et aciers dans les mines. Procédés d'amélioration. Tôles, fers spéciaux, etc. Fontes. Aciers moulés, etc., etc. Cuivres, bronzes, nickel, etc. (Monographies des produits métallurgiques figurant à l'Exposition de 1878).

Études métallurgiques : Produits secondaires des hauts fourneaux. Alliages divers. Déphosphoration de la fonte, par L. GRUNER. In-8°, 51 pages... 2 fr.

L'électro-sidérurgie, par le prof. BORCHERS et C. GARNIER. In-8°.... 1 fr.

Principes du traitement des minerais métalliques, par RIVOT, ancien directeur du laboratoire de l'École des Mines, ingénieur en chef des Mines. 3 vol. in-8° 16 × 25, 2.080 p. et 1 atl. 35 × 24 de 40 pl.(1873) 55 fr.

I. *Métallurgie du cuivre.* Considérations générales sur les fours. Classification des minerais de cuivre. Traitement : du cuivre natif, des minerais oxydés, des minerais pyriteux, des minerais pauvres et argentifères dans le Mansfeld. Amalgamation du cuivre noir.

II. *Métallurgie du plomb et de l'argent.* Classification. Traitement : des minerais sulfurés, des minerais carbonatés, des sulfates de plomb. Coupellation du plomb d'œuvre. Coupellation anglaise. Traitement de la galène. Traitement des minerais complexes. Traitement des minerais de plomb argentifères. Traitement des minerais d'argent.

III. *Notes et mémoires.* Minerais de la Haute-Silésie. La houillère, les mines et l'usine à zinc de Stolberg. Voyage en Hongrie. Voyage au lac Supérieur. Préparation mécanique des minerais de plomb dans le Ober-Harz. Gîtes métallifères et traitement des minerais de Pontgibaud. Filons de Vialas. Nouveau procédé de traitement des minerais d'or et d'argent. Examen des farines et des pains.

Des hauts fourneaux. Ouvrage destiné aux élèves qui viennent de terminer leurs études et se destinent à la métallurgie de la fonte, par V. HENRION, ingénieur, chef du service des hauts fourneaux de Pont-à-Mousson. In-8° de 52 pages et 3 planches.. 2 50

Métallurgie du fer et de la fonte, par BRESSON, ingénieur civil des Mines. In-8° 16 × 25 de 145 pages avec 52 figures....................... 6 fr. 25

Minerais. Fondants. Combustibles. Concassage. Lavage. Grillage. Construction des hauts fourneaux. Etude de leurs parties et des appareils accessoires. Leur roulement. Classification et propriétés des fontes brutes. Fabrication de la fonte. Moulages. Affinage. Fabrication du fer soudé. Fers laminés. Bibliographie.

La fonderie de fer, par J. BOITEUX, direct. des hauts fourneaux et fonderies de la Louvière. In-8° 16 × 24 avec figures et 4 planches....... 6 fr.

Nature, classement, pays producteurs, propriétés physiques des fontes. Appareils et substances en usage dans la fonderie. Procédés. Défauts. Calculs. Analyses. Tables numériques.

La fonderie moderne, par le bureau technique du M. S. I. accompagné d'interviews de MM. PERCY LONGMUIR de Londres, et WALTER J. MAY, ingénieurs-spécialistes en fonderie. In-8° de 70 pages avec 57 fig..... 2 fr. 50

Traité pratique de la fabrication du fer et de l'acier puddlé, comprenant l'application de ces matières à la confection des différents échantillons livrables au commerce, par ANSIAUX, ingénieur civil, et MASION, chef de fabrication. In-8° 16 × 23 de 282 p. et 1 atlas 17 × 25 de 28 pl... 15 fr.

Fabrication du fer. *Production du fer ductile.* Matières premières. Appareils. *Affinage de la fonte au four à réverbère.* Travail des fours à puddler. Puddlage. Fabrication de l'acier puddlé. *Traitement du fer ductile.* Dégrossissage. Cinglage. Etirage. Laminage. *Traitement des fers ébauchés et de la ferraille.* Corroyage. Ferraille. Finissage au laminoir. *Fabrication des échantillons.* Fers marchands et fers non profilés. Tôle. Fil de fer. Fer étamé ou galvanisé. *Fers façonnés et fers profilés.* Fabrication des fers propres aux constructions civiles, aux charpentes, aux ponts et aux bateaux. *Petits fers. Organisation des usines à fer.* Dispositions intérieures. Appareils et services accessoires. Administration. Personnel. Comptabilité. Prix de revient et de vente.

Traité théorique et pratique du travail du fer et de l'acier, par ZABÉ. In-8° avec 24 planches.. 10 fr.

Fers et aciers. — RÉSISTANCE ET ESSAIS (Voir pages 14 à 19 et page 107).

Métallurgie de l'acier, par Bresson, ingénieur civil des Mines. In-8° 16 × 25 de 175 pages avec 34 figures........................... 8 fr. 75

Constitution des aciers. Influence de la composition chimique de l'acier sur ses propriétés physiques et mécaniques. Influence de la chaleur et du magnétisme. Influence des opérations de la fabrication. Classification. *Modes divers de fabrication.* Acier Bessemer. Acier Martin Acier au creuset. Cémentation. *Emploi des aciers.* Dégrossissage. Chemins de fer. Guerre Marine. Industries diverses. Bibliographie.

L'acier et sa fabrication, par Gruner, inspecteur général des Mines. 2 vol. in-8° avec planches.. 7 fr. 50

Les plaques de blindage. Emploi des métaux, essais, par L. Baclé, ingénieur. In-4° 23 × 28 avec 200 figures et similis hors texte.......... 10 fr.

Intérêt scientifique et aperçu historique de la question des cuirassements. Applications de divers types de métaux au blindage. Formules de perforation. Conditions de recette. Essais effectués avant et depuis 1891. Cuirassements pour forteresses. Conclusions. Tableaux résumant les résultats des essais.

Traité du fer, par Landrin, ingénieur. In-8° 15 × 23 de 303 pages avec figures et planches (1864).. 9 fr.

Histoire du fer. Matières premières : Oxydes et minerais. Oxydes terreux et fondants. Des combustibles. *Métallurgie :* Docimasie. Production de la fonte. Fours. Affinage. Mazéage ou finage. Puddlage. Fabrication directe du fer. Du fer: Constitution et propriétés, travail, résistance, etc.

Essai pratique sur l'emploi ou la manière de travailler l'acier (1835), par Damemme. In-8° de 450 p. avec nombr. pl............... 7 fr.

Métallurgie du cuivre, précédée de généralités sur la métallurgie. par Gruner, inspecteur général des Mines, et Roswag, ingénieur civil des Mines. In-8° 16 × 25 de 418 pages avec 97 fig. et 2 pl... 22 fr. 50

Agents métallurgiques. *Combustibles.* Combustibilité. Flamme. Pouvoir calorifique. Combustibles : naturels, préparés. *Appareils. Procédés.* Propriétés générales des métaux. *Propriétés du cuivre.* Minerais de cuivre. *Traitement :* par voie ignée, par voie humide, par sulfaration et chloruration ; procédés mixtes ; procédés fondés : sur l'acide acétique et autres réactifs chimiques ; sur l'électricité. *Essais et analyses chimiques. Marchés. Variations de prix.* Notes diverses.

Métallurgie du nickel et du cobalt, par Villon, ingénieur. In-8° 16 × 25 de 112 pages avec 26 figures...................................... 5 fr.

Le nickel et ses propriétés. Les minerais de nickel. Extraction. Préparation du nickel métallique. Alliages. Nickelage. Le cobalt et ses minerais. Traitement des minerais. Alliages. Cobaltisage.

Mémoire sur la métallurgie du nickel, par Badoureau, ingénieur des Mines. In-8° avec planches.. 4 fr.

Métallurgie de l'aluminium, par Wickersheimer, ingénieur en chef des Mines. In-8° 16 × 25 de 96 pages avec figures................... 3 fr. 75

Propriétés physiques et chimiques de l'aluminium. Travail de l'aluminium. Son emploi. Alliages. Bronzes. Laiton. Maillechort d'aluminium. Alliages divers. Fabrication de l'aluminium et de ses alliages. Procédés divers. Usines. Conclusion.

Dictionnaire des arts et manufactures et de l'agriculture, par Ch. Laboulaye, et une réunion de savants, d'ingénieurs et d'industriels. 7e édit., revue, complétée et mise à jour.

Les livraisons peuvent être vendues séparément au prix de 2 fr. 50 l'une.

Prix de l'ouvrage complet en cinq gros vol. 18 × 28 avec 5.800 fig.. 120 fr.

Le Dictionnaire des arts et manufactures embrasse toutes les *applications industrielles des sciences :* on peut s'en convaincre par l'examen des principaux articles qui y sont contenus et qui, si on les groupe par nature de sujets, comme nous le faisons dans la nomenclature ci-après, constituent autant de traités spéciaux et complets, formant une véritable bibliothèque technologique.

Table méthodique du Dictionnaire Laboulaye :

Physique industrielle. — Éléments des sciences et constitution des corps. Introduction, 1re *livr.* — Cristallisation, 12e *livr.* — Filtration, 17e *livr.* — Liquéfaction des gaz, 18e, 22e et 45e *livr.* — Hygrométrie, 20e *livr.* — Solubilité des sels, des gaz, 48e *livr.*

Machines à AIR CHAUD, à AIR COMPRIMÉ, 4e et 41e *livr.* — Filières, 17e *livr.* — Freins, 18e et 44e *livr.* — Grues, 19e et 36e *livr.* — LOCOMOTIVES, locomotives routières, 22e *livr.* — MACHINES A VAPEUR, 22e, 23e et 46e *livr.* — MACHINES-OUTILS, 23e *livr.* — Pompes, 28e et 29e *livr.* — Presses, 29e et 47e *livr.* — Tour, Transmission du travail, 36e *livr.* — Ventilateurs, 36e, 37e et 49e *livr.* — Injecteurs, 45e *livr.* — Perforateurs, Pilotis, 46e *livr.* — TOURS COMPOSÉS, Vélocipèdes, 49e *livr.*

Compteurs d'eau, 11e *livr.* — Hydrauliques, turbines, 19e et 20e *livr.*

Fabrications mécaniques. — Bonneterie, Brosserie, 7e *livr.* — Broderie, 7e, 40e et 42e *livr.* — Chapellerie, 8e et 9e *livr.* — Coutellerie, Coton, Machine à coudre, 12e *livr.* — Dentelles, 13e, 40e et 43e *livr.* — Jute, Laines, 21e *livr.* — Lin, 22e *livr.* — Soie, 32e *livr.* — TISSAGE, 35e, 36e et 40e *livr.* — Apprêts, 5e et 41e *livr.*

Aiguilles, 4e *livr.* — MOULINS à meules, à cylindres, Monnaies, 25e *livr.* — Scierie mécanique, 31e *livr.* — Tubes, Tuyaux, 36e et 49e *livr.* — Armes à feu, 41e *livr.* — Revolvers, 47e *livr.*

Chaudronnerie, 9e *livr.* — CONSTRUCTION DES MACHINES, 11e, 22e et 23e *livr.*

Constructions, Travaux publics, Mines. — Bois, 7e *livr.* — Briques, briques creuses, 7e et 42e *livr.* — Maçonneries, 23e *livr.* — Résistance des matériaux, 30e *livr.* — Grosse SERRURERIE et Constructions métalliques, 31e et 32e *livr.* — Terrassements, 35e *livr.* — Voûtes, 37e *livr.* — Ascenseurs, 41e *livr.* — Charpentes, Charronnage, 42e *livr.* — Couverture, Échafaudage, 43e *livr.* — EXPLOSIFS, 16e *livr.* — Fondations, 44e *livr.* — Matériaux de construction, Menuiserie, 46e *livr.* — Serrurerie, 47e *livr.* — Stéréotomie, STATIQUE GRAPHIQUE, 48e *livr.* — Tramways, 49e *livr.*

CANAUX, 8e *livr.* — CHEMINS DE FER et voies économiques, 9e et 10e *livr.* — EAUX (distribution d') et aqueducs, 13e et 14e *livr.* — Fortifications et Cuirassements, 18e et 43e *livr.* — Pavage, 27e et 28e *livr.* — Phares, 28e et 32e *livr.* — PONTS, 29e *livr.* — Poudre, 29e et 47e *livr.* — Routes, Rouleaux, 30e *livr.* — Salubrité, 31e *livr.* — Tunnels, 36e *livr.* — Égouts, 43e *livr.*

Anthracite, 5e *livr.* — FEU GRISOU, 17e *livr.* — Houille, 19e *livr.* — Lampes de sûreté, 21e et 22e *livr.* — Mines et carrières, 24e *livr.* — Sondages, 32e *livr.* — Puits de mines, 47e *livr.*

Art naval. — Batellerie, BATEAUX A VAPEUR, Bateau sous-marin, 6e, 41e et 42e *livr.* — Boulets de la marine, 45e *livr.* — Boussole, 7e et 42e *livr.* — Construction des navires, 11e *livr.* — Doublage des navires, 13e *livr.* — Hélice, 19e et 45e *livr.* — Hydrographie, 20e *livr.* — Loch, 22e et 46e *livr.* — Navigation, 25e *livr.* — Sondages à la mer, 32e *livr.* — Torpilles, Vagues, 36e *livr.* — Voilure, 37e *livr.* — CUIRASSEMENT des navires, 43e *livr.* — Gouvernail, 45e *livr.* — Navires, 46e *livr.* — Plongeur (scaphandre), Remorque, 47e *livr.*

Arts d'imitation et Arts industriels. — Dessin industriel, 13e, 19e et 40e *livr.* — Ecritures, 19e et 40e *livr.* — Perspective, 28e *livr.* — Chromographes (machines à écrire), 42e *livr.* — Fonderie de fer, de cuivre, FONDERIE DE CARACTÈRES, 17e *livr.* — GRAVURE et photogravure, 18e, 19e et 40e *livr.* — Papiers peints, Gaufrage, 18e, 27e et 40e *livr.* — IMPRIMERIE typographique et en taille-douce, IMPRESSION SUR ÉTOFFES, 20e et 40e *livr.*

LITHOGRAPHIE, 22e et 40e *livr.* — PHOTOGRAPHIE, 28e et 40e *livr.* — Stéréotypie, 32e et 33e *livr.* — Moulages, 46e *livr.*

Châles, Cachemires, 8e et 40e *livr.* — Orfèvrerie, 27e et 39e *livr.* — Sculpture, 31e, 39e et 49e *livr.* — Architecture, Céramique, 38e *livr.* — Meubles, Peinture, 39e *livr.* — Chromolithographie, Emaux, Mosaïque, Vitraux, Tissus, Etoffes, Tapis, 40e *livr.* — Musées d'art industriel, 40e et 46e *livr.*

Economie industrielle. — Statistiques. — Accidents du travail, Assurances, 2e et 32e *livr.* — Caisse de retraites, 8e et 50e *livr.* — Capital et travail, salaires, 8e, 32e, 49e et 50e *livr.* — Coopération, 11e et 39e *livr.* — Economie des manufactures, 15e, 49e et 50e *livr.*

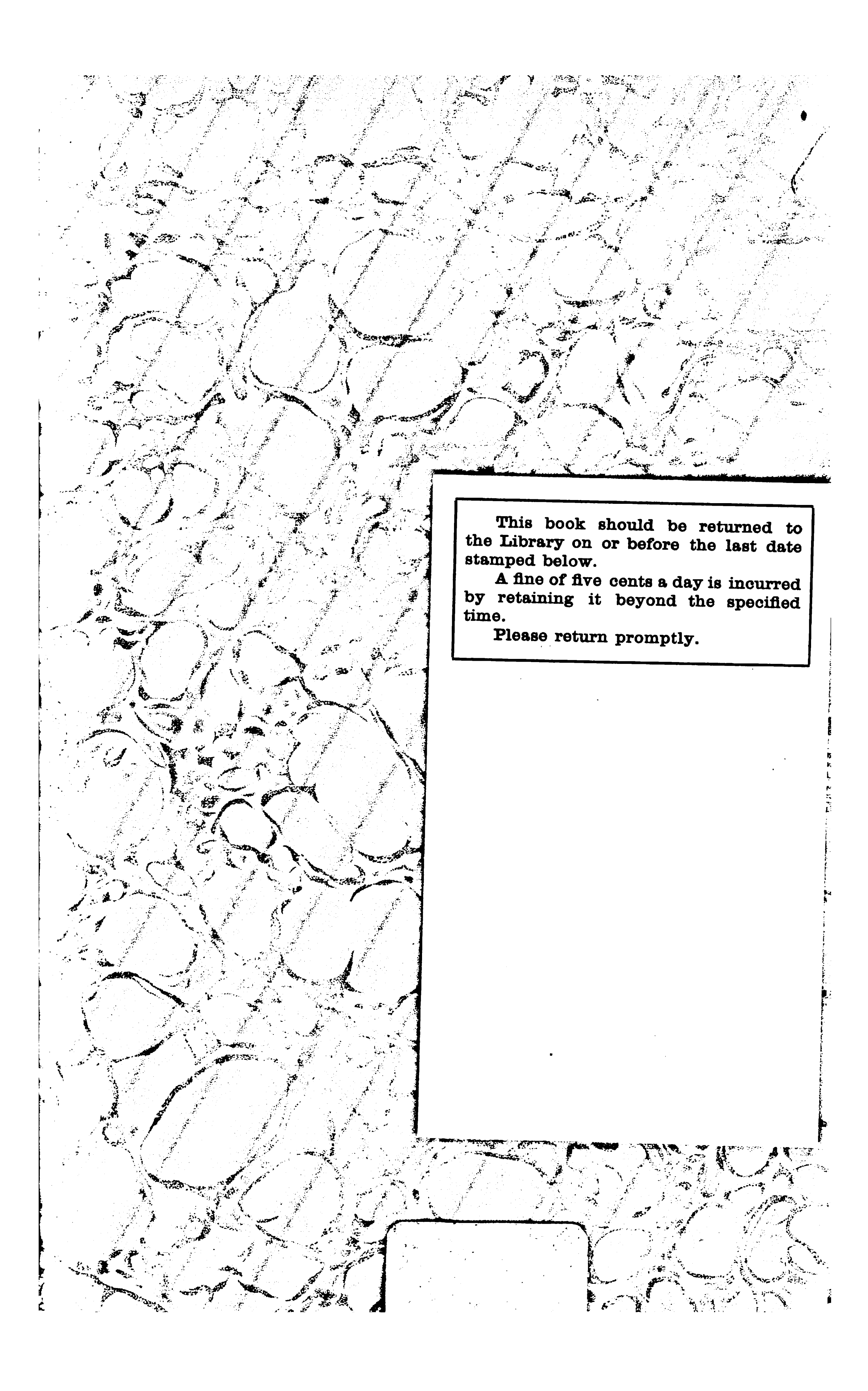
Monnaie, Etalon monétaire, 16e et 49e *livr.* — RÉGLEMENTATION DU TRAVAIL, 30e, 49e et 50e *livr.* — SYNDICATS PROFESSIONNELS, 33e et 50e *livr.* — Socialisme, 48e, 49e et 50e *livr.* — Crédit, Monopoles, 50e *livr.*

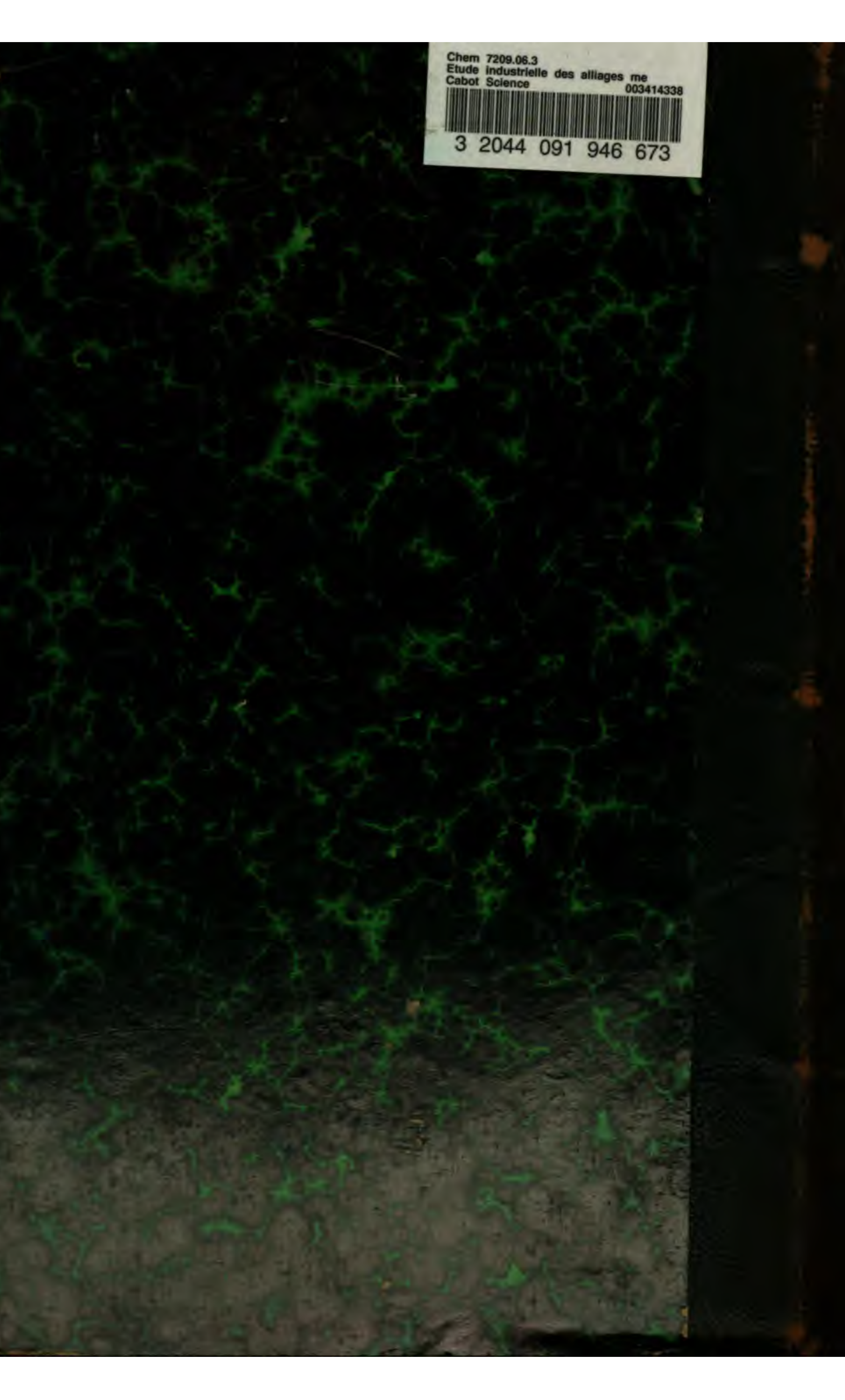
Conservatoire des Arts et Métiers, 11e et 43e *livr.* — ENSEIGNEMENT INDUSTRIEL, 16e et 50e *livr.* — Invention, brevets d'invention, 21e et 50e *livr.*

EXPOSITIONS, Classification des produits de l'industrie, 11e et 44e *livr.* — STATISTIQUES diverses, 32e *livr.*

TOURS, IMPRIMERIE DESLIS FRÈRES.






Chem 7209.06.3
Etude industrielle des alliages me
Cabot Science
003414338
3 2044 091 946 673